

CONTRIBUIÇÃO PARA A PREVISÃO DE CHEIAS E PARA A DIMINUIÇÃO DA
VULNERABILIDADE E RISCO. APLICAÇÃO NA ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA

CLÁUDIA CRISTINA LEAL BRANDÃO PEREIRA PINHEIRO

ORIENTADOR: Professor Associado Paulo Guilherme Martins de Melo Matias

TESE ELABORADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DO
AMBIENTE

2018

CONTRIBUIÇÃO PARA A PREVISÃO DE CHEIAS E PARA A DIMINUIÇÃO DA
VULNERABILIDADE E RISCO. APLICAÇÃO NA ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA

CLÁUDIA CRISTINA LEAL BRANDÃO PEREIRA PINHEIRO
ORIENTADOR: Professor Associado Paulo Guilherme Martins de Melo Matias

TESE ELABORADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DO
AMBIENTE

JÚRI

Presidente: Doutor António José Guerreiro de Brito
Professor Associado com Agregação
Instituto Superior de Agronomia
Universidade de Lisboa.

Vogais: Doutor João Luís Mendes Pedroso de Lima
Professor Catedrático
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra;

Doutor Paulo Guilherme Martins de Melo Matias
Professor Associado
Instituto Superior de Agronomia
Universidade de Lisboa;

Doutor Carlos Miranda Rodrigues
Professor Auxiliar
Escola de Ciências e Tecnologia
Universidade de Évora;

Doutor Rodrigo de Almada Cardoso Proença de Oliveira
Professor Auxiliar
Instituto Superior Técnico
Universidade Lisboa;

Doutor Rui José Raposo Rodrigues
Investigador Auxiliar
Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

2018

À minha filha, ao meu marido e aos meus pais.

Agradecimentos

No decurso dos trabalhos que conduziram à elaboração da presente dissertação, diversas pessoas e entidades dispensaram a sua colaboração que reconhecidamente pretendo agradecer.

Exprimo o meu reconhecimento muito especial ao Prof. Doutor Paulo Guilherme de Melo Matias, orientador da dissertação, que de perto acompanhou a sua realização, pelos muitos conhecimentos transmitidos, explicações e sugestões no domínio da hidrologia, pelo elevado rigor manifestado durante a aquisição e análise dos dados e, por fim, pela cuidadosa e atenta apreciação do texto, que muito contribuiu para a valorização da dissertação. Não posso deixar de enaltecer as qualidades humanas do meu orientador, que é um verdadeiro professor, porque gosta de ensinar, tendo a habilidade de corrigir sem nunca dizer que está errado.

Agradeço, do fundo do meu coração, à minha querida, bondosa e maravilhosa família que abdicou do seu tempo e recursos e me motivou para que pudesse concretizar esta tarefa (dissertação). Agradeço o grande carinho e estima dos meus progenitores que sempre incentivaram e confiaram em mim e que tudo fizeram para que tivesse confiança nas minhas capacidades. Agradeço a generosidade, o pragmatismo, o companheirismo e o sentido de objetividade do meu querido marido António e a compreensão e a paciência da minha adorada filha Joana Rita. Agradeço à minha querida irmã Sofia, pelo seu incondicional apoio, ao meu cunhado e às minhas afetuosas sobrinhas, por se lembrarem sempre de mim.

Agradeço aos meus colegas e amigos da Divisão do Estado das Disponibilidades Hídricas – DEDH pela disponibilidade visando auxiliar o desenvolvimento das tarefas da Agência Portuguesa do Ambiente, que permitiram a minha ausência temporária da divisão, de forma a conseguir concretizar este meu objetivo de vida. Agradeço, especialmente, o grande empenho, dedicação e amizade da Dr.^a Sofia Cunha visando desempenhar com sucesso as tarefas árduas associadas aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que foram essenciais à prossecução da dissertação.

Agradeço à Dr.^a Maria João Lam todo o seu incentivo, força, amizade e conselhos transmitidos para que conseguisse finalizar esta longa “peça”.

Agradeço ao IPMA, I.P. nomeadamente ao Dr. Sérgio Barbosa, Dr. Nuno Moreira e Dr.^a Clara Freitas, a autorização para a cedência dos dados do radar meteorológico de Cruz de Leão (Coruche) e a disponibilização de diversa informação conexa com o radar, dos dados diários das estações climáticas do IPMA, I.P., localizadas na área do estudo, bem como da caracterização sinópticas dos eventos hidrometeorológicos analisados. Agradeço à Dr.^a Maria Emília Macedo a cedência de dados do radar meteorológico.

Agradeço ao ex-Instituto da Água, organismo procedente dos “Serviços Hidráulicos”, que possibilitou o contacto com a história e com o saber dos recursos hídricos nacionais e, em especial, ao Eng. Rui Rodrigues (investigador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil) pela partilha da sua enorme experiência técnica e pelo apoio e incentivo à prossecução deste estudo, visando aprofundar o meu conhecimento científico no âmbito da hidrologia.

Agradeço, finalmente a todos os colegas que, de alguma forma, colaboraram ou apoiaram a realização deste trabalho.

CONTRIBUIÇÃO PARA A PREVISÃO DE CHEIAS E PARA A DIMINUIÇÃO DA VULNERABILIDADE E RISCO. APLICAÇÃO NA ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA

Nome Cláudia Cristina Leal Brandão Pereira Pinheiro
Doutoramento em Engenharia do Ambiente
Orientador Paulo Guilherme Matias

Resumo

As cheias contam-se entre as catástrofes naturais que, ao longo dos tempos, maiores prejuízos materiais e perda de vidas humanas têm provocado. Em Portugal, são as catástrofes mais frequentes e estão em segundo lugar em termos do número de mortos, pessoas afetadas e prejuízos registados (Base de Dados Internacional de Desastres, EM-DAT). Com o objetivo de reduzir as consequências prejudiciais associadas às cheias, o Homem tem, desde há muito, construído obras hidráulicas para proteção contra cheias, e, mais recentemente, desenvolvido sistemas de previsão, visando alertar a população, sobretudo em zonas onde não é possível implementar soluções estruturais para proteção contra cheias.

Neste estudo calibrou-se um conjunto de submodelos de diferentes processos hidrológicos para simular os hidrogramas de cheia de sete bacias hidrográficas localizadas na densamente povoada região metropolitana de Lisboa. As bacias analisadas correspondem a sete estações hidrométricas, com dimensões entre cerca de 10 e 100 km², localizadas no rio Jamor, na ribeira de Barcarena, na ribeira de Loures, na ribeira da Laje, no rio Trancão, no rio de Colares e na ribeira de Caparide. Os hidrogramas unitários determinados permitirão produzir diversos níveis de aviso e, em conjunto com um modelo hidráulico, avaliar as zonas inundáveis, contribuindo para diminuir a vulnerabilidade do território às cheias e os consequentes riscos. Com este desígnio, efetuou-se a caracterização espacial da precipitação recorrendo aos valores medidos nas estações udográficas da Autoridade Nacional da Água e do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. e aos valores estimados através das imagens do radar meteorológico de Cruz do Leão, em Coruche. A utilização dos valores do radar meteorológico foi precedida da calibração da intensidade de precipitação horária por este estimada, com base nos registos dos udógrafos. As relações de calibração foram determinadas considerando eventos chuvosos significativos, em termos de quantidade de precipitação e de caudais registados nas sete bacias hidrográficas. Para as bacias referidas, foram estabelecidos hidrogramas unitários próprios, utilizados conjuntamente com outros hidrogramas unitários (Soil Conservation Service, Temez e Clark), recorrendo ao programa HEC-HMS.

Foram também comparadas as relações obtidas entre a refletividade medida pelo radar e a intensidade da precipitação com as referidas na bibliografia especializada, (e.g. Marshall e Palmer, 1948).

O melhoramento da caracterização espacial da precipitação, com recurso às imagens do radar meteorológico calibradas, em conjugação com o conhecimento do hidrograma unitário mais adequado e do melhor modelo de perdas permitiu a realização de mais fiáveis simulações hidrológicas das cheias nas bacias estudadas.

Palavras-chave: cheias, hidrogramas unitários; modelação hidrológica; radar meteorológico; refletividade.

A CONTRIBUTION FOR FLOOD FORECAST AND FOR THE REDUCTION OF THE ASSOCIATED VULNERABILITY AND RISK. APPLICATION TO THE METROPOLITAN AREA OF LISBON

Abstract

Floods are within the natural catastrophes that have caused significant damages and losses of human lives. In Portugal, floods are the most frequent catastrophes and they are ranked in second place as far as the number of casualties, the number of affected persons and the amount of damages (The International Disasters Database, EM-DAT). With the purpose of reducing the consequences associated with the flood events, Man has, long ago, constructed hydraulic works for flood control and protection, and, more recently, developed flood forecast systems, with the aim of warning the populations living in the affected areas, mainly where no structural measures against flood protection can be implemented.

In the present study, the calibration of a set of hydrological processes models to simulate the floods in seven catchment areas located in the densely populated area of the Lisbon metropolitan region is performed. The studied catchments, with areas ranging within 10 and 100 km², correspond to seven water level gauging stations located in the following streams: Jamor, Barcarena, Loures, Laje, Trancão, Colares and Caparide. The obtained flood hydrographs will allow the establishment of different warning levels and, together with a hydraulic model, assess the flooded areas, therefore contributing to reduce the vulnerability of the territory and the consequent risks. With this holistic objective, the spatial characterization of the precipitation was carried out, based on the data available from the rain gauge networks of the Autoridade Nacional da Água and of the Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. and to the precipitation values estimated from the images provided by the meteorological radar of Cruz do Leão, located close to Coruche. The use of the data provided by this radar was calibrated considering the hourly precipitations estimated by the radar and the corresponding data of the precipitation gauges. The calibration was determined considering meteorological events with significant values of precipitation and discharges for the seven catchments areas. For these catchments, specific unit hydrographs were established. These ones and some other unit hydrographs (Soil Conservation Service, Temez e Clark) were used for the simulation of the flood events using the software HEC-HMS.

The obtained relations between the reflectivity measured by the radar and the intensity of precipitation were compared with the ones published in the scientific literature (e.g. Marshall and Palmer, 1948).

The improvement of the spatial characterization of the precipitation, based on the calibrated data provided by the radar, together with the acquired knowledge about the most adequate unit hydrograph for these catchments and about the most adequate water losses model allowed for more reliable hydrograph simulations.

Keywords: floods, unit hydrograph; hydrological modelling; meteorological radar; reflectivity.

Índice Geral

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO.....	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE GERAL.....	IX
ÍNDICE DE CONTEÚDOS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE QUADROS.....	XVII
SIMBOLOGIA	XXI
ACRÓNIMOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.....	XXVII

Índice de Conteúdos

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	6
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	7
2. CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS E DOS ACONTECIMENTOS A ANALISAR.....	9
2.1. CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICA DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS	9
2.2. DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS	11
2.3. SELEÇÃO DOS ACONTECIMENTOS HIDROLÓGICOS	16
2.4. AVALIAÇÃO DAS CURVAS DE VAZÃO	23
2.5. INFORMAÇÃO SINÓPTICA E DADOS SINÓPTICOS E DO RADAR METEOROLÓGICO EM CRUZ DO LEÃO	29
2.6. CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS COM BASE NOS DADOS DAS ESTAÇÕES UDOGRÁFICAS	30
3. CALIBRAÇÃO DO RADAR METEOROLÓGICO SITUADO EM CRUZ DO LEÃO	39
3.1. MONITORIZAÇÃO COM O RADAR METEOROLÓGICO.....	39
3.1.1. <i>História e Conceitos</i>	39
3.1.2. <i>Revisão bibliográfica sobre calibração do radar meteorológico</i>	57
3.2. O RADAR METEOROLÓGICO DE CRUZ DO LEÃO	69
3.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS PRECIPITAÇÕES ESTIMADAS PELO RADAR METEOROLÓGICO EM CRUZ DO LEÃO (R) E AS PRECIPITAÇÕES REGISTRADAS NA REDE UDOGRÁFICA (U).....	73
3.3.1. <i>Análise pontual ao longo do tempo</i>	73
3.3.2. <i>Análise espacial</i>	83
3.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO.....	86
4. DETERMINAÇÃO DE HIETOGRAMAS DE PRECIPITAÇÃO EFICAZ E DE HIETOGRAMAS UNITÁRIOS.....	93
4.1. CONCEITOS DE BASE E DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS UTILIZADOS	93
4.1.1. <i>Escoamento superficial e seus componentes</i>	93
4.1.2. <i>Precipitação útil e Escoamento direto</i>	96
4.1.3. <i>Hietograma de cheia</i>	101
4.2. DETERMINAÇÃO DE HIETOGRAMAS FINAIS NAS SECÇÕES DAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS CONSIDERADAS	137
4.2.1. <i>Hietogramas de escoamento direto</i>	137
4.2.2. <i>Hietograma de precipitação eficaz ou útil</i>	138
4.2.3. <i>Tempos característicos dos hietogramas de escoamento direto</i>	141
4.2.4. <i>Determinação dos hietogramas unitários observados</i>	142
4.2.5. <i>Determinação dos hietogramas unitários de Clark</i>	146
4.2.6. <i>Obtenção do hietograma unitário sintético adimensional padronizado únicos</i>	153
4.2.7. <i>Obtenção do hietogramas unitários específicos para cada bacia hidrográfica</i>	156
4.2.8. <i>Obtenção de um hietograma unitário sintético curvilíneo para a região</i>	158

4.2.9. Comparação entre hidrogramas unitários sintéticos adimensionais.....	163
4.2.10. Conclusões	164
5. MODELAÇÃO PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO	169
5.1. MODELAÇÃO HIDROLÓGICA ATRAVÉS DO HEC-HMS.....	169
5.2. REFERÊNCIA SUMÁRIA DOS MODELOS HIDROLÓGICOS NO HEC-HMS, RELEVANTES PARA A PROSECUÇÃO DO ESTUDO	169
5.3. INFORMAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DE SUPORTE À MODELAÇÃO HIDROLÓGICA	171
5.4. SELEÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO.....	180
5.5. RESULTADOS HIDROLÓGICOS DA SIMULAÇÃO DOS ACONTECIMENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS.....	200
5.6. PROPOSTAS DE MELHORIA DO SISTEMA DE VIGILÂNCIA E ALERTA DE RECURSOS HÍDRICOS (SVARH)	203
5.7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	206
6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	209
6.1. ENQUADRAMENTO.....	209
6.2. CONCLUSÕES.....	210
6.2.1. Do Capítulo 2.....	210
6.2.2. Do Capítulo 3.....	210
6.2.3. Do Capítulo 4.....	212
6.2.4. Do Capítulo 5.....	215
6.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	216
BIBLIOGRAFIA.....	219

ANEXOS: 1, 6, 13,14, 15, 16, 17 (suporte papel e digital)

Anexo 1- Portefólio de fotografias das estações meteorológicas e hidrométricas da Autoridade Nacional da Água.

Anexo 6 – Esquízo das seções de seis estações hidrométricas: Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Pinhal e Colares.

Anexo 13 - Valores dos parâmetros que definem o hidrograma unitário sintético para as sete bacias hidrográficas, segundo Temez e Mockus (SCS triangular).

Anexo 14 - Confrontação, para as sete bacias hidrográficas em análise, entre as redes hidrográficas resultante do MET com célula de 80 m x 80 m, obtida a partir do SRTM, e a partir da cartografia do Instituto Geográfico do Exército (rede hidrográfica geocodificada da APA, baseada na escala 1:25 000).

Anexo 15 - Características hidrológicas médias dos hidrogramas totais: caudal de ponta de cheia Q_p ($m^3 s^{-1}$), caudal de base no instante t_0 , Q_{b0} ($m^3 s^{-1}$), caudal de início de recessão, Q_r ($m^3 s^{-1}$), coeficiente de escoamento, C_e , constantes de exaurimento, α (h^{-1}), e tempo de base, t_b (h), relativos às estações hidrométricas analisadas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal, para cada acontecimento analisado.

Anexo 16 - Características hidrológicas dos hidrogramas de escoamento direto: Número de Escoamento, N (inicial e calibrado), perdas iniciais, I_a (mm), Índice Φ (mm), armazenamento ou retenção potencial máxima de água no solo, S (mm), tempo para a ponta, T_p (h), tempo de atraso (t_i) e tempo de concentração, t_c (h); associados a cada acontecimento analisado, para as bacias hidrográficas definidas em Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.

Anexo 17 – Mapas de isócronas e respetivos diagramas tempo-área, associados aos quatro métodos de determinação de isócronas, para as bacias hidrográficas definidas em Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.

ANEXOS: 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12 (suporte digital)

Anexo 2 – Precipitação horária dos períodos temporais modelados hidrológicamente (SNIRH e IPMA, I.P.).

Anexo 3 – Níveis hidrométricos instantâneos dos períodos temporais modelados hidrológicamente (SNIRH).

Anexo 4 – Curvas de dupla acumulação e resultados do método dos resíduos acumulados para 12 estações meteorológicas do SNIRH.

Anexo 5 – Curvas de vazão e medições de caudal associadas às estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Pinhal e Colares (SNIRH).

Anexo 7 – Caracterização das situações sinópticas dos períodos temporais selecionados para análise.

Anexo 8 – Caracterização das tipologias de base à estimativa da distribuição espacial da precipitação.

Anexo 9 - Áreas de influência dos Polígonos de Thiessen para cada uma das sete bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas.

Anexo 10 – Ajustamento à relação U-Repção.

Anexo 11 – Hidrogramas unitários finais obtidos pelo método gráfico.

Anexo 12 - Mapa de Portugal com a distribuição dos Números de Escoamento (N), para a situação AMCII.

Anexo 18 – Resultados da aplicação do método backward elimination.

Anexo 19 – Resultados das seis estatísticas de avaliação do ajustamento dos hidrogramas simulados aos hidrogramas observados (SR, MRA, SQR, NS, PEQp e PETp).

Anexo 20 - Comparação entre hidrogramas observados e simulados e entre informações associados aos hidrogramas (volume e tempo para a ponta de cheias).

Índice de Figuras

FIGURA 1.1 – CICLO HIDROLÓGICO, COM BALANÇO ANUAL MÉDIO EM UNIDADES RELATIVAS A UM VOLUME ANUAL DE PRECIPITAÇÃO CONTINENTAL DE 100 UNIDADES (ADAPTADO DE MATIAS, 2006A E CHOW, 1988).	1
FIGURA 1.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS MATEMÁTICOS (ADAPTADO DE MATIAS, 2006A E CHOW, 1988).	2
FIGURA 2.1 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS ATIVAS E INATIVAS E DELIMITAÇÃO DAS RESPECTIVAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.	9
FIGURA 2.2 – LOCALIZAÇÃO DO TOTAL DAS ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO DA AUTORIDADE NACIONAL DA ÁGUA (SNIRH) E DO INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA (IPMA, I.P.).	16
FIGURA 2.3 – MÉDIA DA PRECIPITAÇÃO DIÁRIA MÁXIMA ANUAL DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS SELECIONADAS.	17
FIGURA 2.4 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS PRECIPITAÇÕES MÉDIAS ANUAIS PARA 14 ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO SNIRH.	21
FIGURA 2.5 – REPRESENTAÇÃO DAS ÚLTIMAS CURVAS DE VAZÃO DAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE LAVEIRAS E COLARES (1989/90) E DAS MEDIÇÕES DE CAUDAL.	24
FIGURA 2.6 – REPRESENTAÇÃO DA ÚLTIMA CURVA DE VAZÃO DA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL (1989/90) E DAS MEDIÇÕES DE CAUDAL.	25
FIGURA 2.7 – REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE VAZÃO DA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE SENHORA DA ROCHA (1989/91 E PROPOSTA DE CURVA DE VAZÃO), DAS MEDIÇÕES DE CAUDAL E DA ESTIMATIVA DE CAUDAL POR MÉTODO HIDRÁULICO.	26
FIGURA 2.8 – ASPETO DO ENCHIMENTO DO LEITO DA RIBEIRA DA COSTA DE 18 DE FEVEREIRO DE 2008, NO INÍCIO DO TROÇO RETILÍNEO REGULARIZADO, LOGO APÓS A CURVA POR BAIXO DA CRIL, EM QUE A CAPACIDADE DE VAZÃO DO LEITO REGULARIZADO FOI PRATICAMENTE PREENCHIDA PARA UMA CHEIA COM O PERÍODO DE RETORNO ABAIXO DOS 100 ANOS (INFORMAÇÃO Nº INT/DMSIDH/2011/44 DE 15 DE JUNHO DE 2011).	27
FIGURA 2.9 – REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE VAZÃO DA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE PONTE PINHAL (1988/89 E 2010/11), DAS MEDIÇÕES DE CAUDAL E DA ESTIMATIVA DE CAUDAL POR MÉTODO HIDRÁULICO.	27
FIGURA 2.10 – ZONA DA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE QUINTA DAS CAMILAS.	28
FIGURA 2.11 – REPRESENTAÇÃO DA ÚLTIMA CURVA DE VAZÃO DA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE QUINTA DAS CAMILAS E DAS MEDIÇÕES DE CAUDAL.	28
FIGURA 2.12 – A) IMAGEM DO RADAR DE CRUZ DE LEÃO ASSOCIADA AO DIA 18/02/2008 (03:00H); B) PORMENOR E SOBREPOSIÇÃO DA IMAGEM DO RADAR DE CRUZ DE LEÃO COM OS PERÍMETROS DAS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS ANALISADAS (RIBEIRA DE BARCARENA, RIBEIRA DE LOURES, RIO TRANCÃO, RIBEIRA DE COLARES, RIBEIRA DE CAPARIDE, RIBEIRA DA LAJE E RIO JAMOR).	30
FIGURA 2.13 – MÉTODO DOS POLÍGONOS DE THIESSEN (ADAPTADO DE CHOW, ET AL., 1988).	32
FIGURA 2.14 – TIPOLOGIAS PARA ESTIMAR A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO NA ÁREA GEOGRÁFICA DEFINIDA PELA TOTALIDADE DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.	34
FIGURA 2.15 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO HORÁRIA POR APLICAÇÃO DOS MÉTODOS IDW2-6 E TIPOLOGIA A DOS POLÍGONOS DE THIESSEN, ASSOCIADOS ÀS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS (IMAGENS QUE CORRESPONDEM AO 2º E 1º MÁXIMO DO EVENTO CHUVOSO DE 18 FEVEREIRO DE 2008 OCORRIDOS, RESPECTIVAMENTE, NAS HORAS 4 UTC E 7 UTC).	35
FIGURA 2.16 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO HORÁRIA POR APLICAÇÃO DOS MÉTODOS IDW2-6 E TIPOLOGIA C DOS POLÍGONOS DE THIESSEN, ASSOCIADO ÀS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS (IMAGENS QUE CORRESPONDEM AO 1º E 2º MÁXIMO DO EVENTO CHUVOSO DO EVENTO CHUVOSO DE 22-23 DE OUTUBRO DE 2006 OCORRIDOS, RESPECTIVAMENTE, NAS HORAS 14 UTC E 5 UTC).	36
FIGURA 2.17 – RELAÇÃO ENTRE AS PRECIPITAÇÕES HORÁRIAS MÉDIAS SOBRE AS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS, OBTIDAS RECORRENDO AOS MÉTODOS DOS POLÍGONOS DE THIESSEN E DE IDW2-6 (CONTINUA).	37
FIGURA 2.17 – RELAÇÃO ENTRE AS PRECIPITAÇÕES HORÁRIAS MÉDIAS SOBRE AS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS, OBTIDAS RECORRENDO AOS MÉTODOS DOS POLÍGONOS DE THIESSEN E DE IDW2-6 (CONTINUAÇÃO).	38
FIGURA 3.1 – ESQUEMA DE UM RADAR DE IMPULSO TIPO (ADAPTADO DE ANGELOLEITHOLD, 2003, HTTP://SITES.GOOGLE.COM/SITE/RADARP5AAL/).	40
FIGURA 3.2 – FUNCIONAMENTO DO RADAR DE IMPULSO (HTTP://WWW.DICIONARIO.PRO.BR/DICIONARIO/INDEX.PHP/RADAR).	40
FIGURA 3.3 – ESQUEMA DO EFEITO DOPPLER, QUE SÓ SE MANIFESTA EM CASO DE MOVIMENTO RELATIVO EMISSOR/RECETOR E OBJETO: A) OBJETO PARADO EM RELAÇÃO A UMA FONTE (SEM EFEITO DOPPLER); B) OBJETO EM MOVIMENTO DE AFASTAMENTO OU DE APROXIMAÇÃO EM RELAÇÃO A UMA FONTE (EFEITO DOPPLER). MANUTENÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA COM OBJETO ESTACIONÁRIO (FAIXAS VERDE) E ALTERAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA COM OBJETO EM MOVIMENTO, DE AFASTAMENTO (FAIXA COR-DE-LARANJA) OU DE APROXIMAÇÃO (FAIXA AZUL) (ADAPTADO DE HTTP://KNOL.GOOGLE.COM/K/STEPHANE-JOURDAN/THE-DOPPLER-EFFECT-S-CONTRIBUTION-IN/3DFVM2OYVUR0N/11# , PORTAL DESCONTINUADO A 1 DE MAIO DE 2012).	41
FIGURA 3.4 – PROJETO OPERA, LOCALIZAÇÃO DOS RADARES METEOROLÓGICOS (HTTP://EUMETNET.EU/WP-CONTENT/THEMES/AERON-CHILD/OBSERVATIONS-PROGRAMME/CURRENT-ACTIVITIES/OPERA/DATABASE/OPERA_DATABASE/INDEX.HTML).	43
FIGURA 3.5 – NEXRAD, LOCALIZAÇÃO DOS RADARES METEOROLÓGICOS (HTTPS://GIS.NCDC.NOAA.GOV/MAPS/NCEI/RADAR).	43
FIGURA 3.6 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO COM IDENTIFICAÇÃO DA GAMA UTILIZADA PELO SISTEMA DE RADAR METEOROLÓGICO - MICRO-ONDAS (COLLIER, 1989).	44
FIGURA 3.7 – POLARIZAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL.	45
FIGURA 3.8 – RELAÇÃO ENTRE UNIDADES DE POTÊNCIA (dBm, mW, W).	46
FIGURA 3.9 – DUAS FORMAS DE OPERAÇÃO DO RADAR (SANTOS DA SILVA, 2006, CIT. POR FARIAS, 2009).	46
FIGURA 3.10 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM RADAR METEOROLÓGICO DE IMPULSO (ADAPTADO DE WMO, 2010).	52

FIGURA 3.11 – CORTE DE UM FEIXE DE RADAR DE UMA ANTENA PARABÓLICA, COM REPRESENTAÇÃO DE LÓBULOS LATERAIS E PRINCIPAL (ADAPTADO DE COLLIER, 1989).	53
FIGURA 3.12 – (A) GEOMETRIA DE UM VOLUME DE IMPULSO DO RADAR (FEIXE). (B) ILUSTRAÇÃO DA OCORRÊNCIA DE RASTREIO E DUM SINAL (ECO) PERMANENTE (PE), PARCIALMENTE OU TOTALMENTE OCULTO, NUMA REGIÃO MONTANHOSA (ADAPTADO DE COLLIER, 1989).	53
FIGURA 3.13 – PROBABILIDADE DE EXISTÊNCIA DE CÉLULAS CONVECTIVAS, EM FUNÇÃO DO VALOR DA REFLECTIVIDADE EXPRESSA EM DBZ E DA ALTITUDE (ADAPTADO DE COLLIER, 1989).	56
FIGURA 3.14 – VISTA GERAL DA TORRE DO RADAR METEOROLÓGICO DO RADAR METEOROLÓGICO EM CRUZ DO LEÃO (CORUCHE), HTTP://WWW.IPMA.PT/PT/EDUCATIVA/ E FOTOGRAFIAS DO AUTOR.	69
FIGURA 3.15 – GRÁFICO DO ALCANCE DE UM RADAR METEOROLÓGICO VERSUS ALTURA DO FEIXE DE ALTURA CENTRAL, SOB CONDIÇÕES PADRÃO DE REFRACTIVIDADE, E ESQUEMA EXEMPLIFICATIVO PARA OBTENÇÃO CAPPI.	71
FIGURA 3.16 – ESQUEMA DE INTERPRETAÇÃO DOS FICHEIROS RAIN1.	73
FIGURA 3.17 – RELAÇÃO $U-R$ GLOBAL (2003, 2006 E 2008) PARA A ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA.	74
FIGURA 3.18 – RELAÇÃO $U-R$ PARA CADA ANO (2003, 2006 E 2008, RESPECTIVAMENTE) PARA A ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA.	75
FIGURA 3.19 – RELAÇÃO $U-R$ GLOBAL (2006 E 2008) PARA A ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA.	76
FIGURA 3.20 – RELAÇÃO $U - R$ PARA AS QUATRO TIPOLOGIAS SINÓPTICAS (1, 2, 3 E 2 MELHORADA) PARA A ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA.	78
FIGURA 3.21 – RELAÇÃO $U - R_{\text{ESTACÃO}}$ PARA 6 ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO DA AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE (CONTINUA).	79
FIGURA 3.21 – RELAÇÃO $U - R_{\text{ESTACÃO}}$ PARA 6 ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO DA AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE (CONTINUAÇÃO).	80
FIGURA 3.22 – RELAÇÃO $U-R_{\text{ESTACÃO}}$ PARA 6 ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO DO IPMA, I.P. (CONTINUA).	80
FIGURA 3.22 – RELAÇÃO $U-R_{\text{ESTACÃO}}$ PARA 6 ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO DO IPMA, I.P. (CONTINUAÇÃO).	81
FIGURA 3.23 – RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DOS AJUSTAMENTOS DAS RELAÇÕES $U-R_{\text{ESTACÃO}}$.	81
FIGURA 3.24 – RELAÇÃO $P-R_{\text{ÁREA}}$ PARA AS OITO ÁREAS GEOGRÁFICAS, CONSIDERANDO OS POLÍGONOS DE THIESSEN (COM E SEM 2003) E IDW2-6 (SEM 2003) (CONTINUA).	84
FIGURA 3.24 – RELAÇÃO $P-R_{\text{ÁREA}}$ PARA AS OITO ÁREAS GEOGRÁFICAS, CONSIDERANDO OS POLÍGONOS DE THIESSEN (COM E SEM 2003) E IDW2-6 (SEM 2003) (CONTINUAÇÃO).	85
FIGURA 3.25 – RELAÇÕES $Z - R$.	89
FIGURA 3.26 – RELAÇÕES $Z - R$ DE BATTAN (1973) (ESQUERDA) E RELAÇÕES INDICADAS NO QUADRO 3.10 (DIREITA).	90
FIGURA 3.27 – RELAÇÕES $Z - R$ GLOBAL, TIPO 1 E TIPO 2- MELHORADO, PROPOSTO POR CIACH, ET AL. (1997) E MARSHALL E PALMER (1948).	90
FIGURA 4.1 – COMPONENTES DE UM HIDROGRAMA (LENCASTRE E FRANCO, 1984).	94
FIGURA 4.2 – REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO PARA SEPARAÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS DO ESCOAMENTO TOTAL: MÉTODO DA LINHA RETA.	96
FIGURA 4.3 – MÉTODO DO ÍNDICE Φ .	98
FIGURA 4.4 – SOLUÇÃO GRÁFICA DA RELAÇÃO PRECIPITAÇÃO TOTAL - ESCOAMENTO DIRETO, EQ. (4.6A) (ADAPTADO DE SCS, 1972).	100
FIGURA 4.5 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CICLO HIDROLÓGICO, EVIDENCIANDO A ÁREA DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO (MATIAS, 2012A, ADAPTADO DE MOREL-SEYTOUX, 1987).	102
FIGURA 4.6 – POSTULADOS DA PROPORCIONALIDADE E DA SOBREPOSIÇÃO NO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO.	103
FIGURA 4.7 – ESQUEMA PARA OBTENÇÃO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO CARACTERÍSTICO RESULTANTE DA ANÁLISE GRÁFICA DE DIFERENTES ACONTECIMENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS (EXEMPLO COM HIDROGRAMAS UNITÁRIOS NÃO ADIMENSIONAIS).	107
FIGURA 4.8 – ESQUEMA PARA OBTENÇÃO DO HIDROGRAMA DIRETO RESULTANTE DA SOBREPOSIÇÃO DE DIFERENTES ACONTECIMENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS.	108
FIGURA 4.9 – HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS ADIMENSIONAIS DO SOIL CONSERVATION SERVICE, CURVILÍNEO E O EQUIVALENTE TRIANGULAR OU DE MOCKUS (ADAPTADO DE SCS, 1972, HOGGAN, 1989 E USDA, 2007).	109
FIGURA 4.10 – HIDROGRAMA SINTÉTICO UNITÁRIO DE TEMEZ (TEMEZ, 1978).	112
FIGURA 4.11 – ISÓCRONAS E DIAGRAMA TEMPO-ÁREA.	114
FIGURA 4.12 – BACIA HIDROGRÁFICA COMO MODELO DE RESERVATÓRIO LINEAR (ADAPTADO DE MATIAS, 2012A).	114
FIGURA 4.13 – DIAGRAMA TEMPO-ÁREA SINTÉTICO (CLARK, HEC-HMS).	118
FIGURA 4.14 – ESQUEMA DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DAS ISÓCRONAS PELO PROCEDIMENTO HIDROLÓGICO (EXEMPLO DE PONTE PINHAL): A - DEFINIÇÃO DA REDE HIDROGRÁFICA; B - IDENTIFICAÇÃO DAS SECÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO; C - REPRESENTAÇÃO DAS ISÓCRONAS OBTIDAS PELO IDW A PARTIR DA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PERCURSO ATÉ À SECÇÃO DE REFERÊNCIA; D - DIAGRAMA TEMPO-ÁREA.	121
FIGURA 4.15 – DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE CÉLULAS MÍNIMAS PARA A DEFINIÇÃO DA REDE HIDROGRÁFICA EM FUNÇÃO DO TAMANHO DAS CÉLULAS.	124
FIGURA 4.16 – RELAÇÃO ENTRE O RAIO HIDRÁULICO E OS CAUDAIS MEDIDOS.	127
FIGURA 4.17 – A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM MAPA DE ASPETOS; B) OITO SENTIDOS DE FLUXO POSSÍVEIS; C) MAPA DE ASPETOS (ADAPTADO DE MAZIERO, ET AL., 2009).	128
FIGURA 4.18 – LIMITES UNILATERAIS DA DISTRIBUIÇÃO DE F DE FISHER-SNEDECOR PARA O NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 0,05, E FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE F DE FISHER-SNEDECOR.	134

FIGURA 4.19 – REPRESENTAÇÃO DOS VÁRIOS NÚMEROS DE ESCOAMENTO ASSOCIADAS AOS ACONTECIMENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS PARA AS VÁRIAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.	140
FIGURA 4.20 – RELAÇÃO ENTRE AS PERDAS INICIAIS OBSERVADAS E AS PERDAS INICIAIS E A CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO RESULTANTES DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DO SCS.	141
FIGURA 4.21 –HIDROGRAMAS DIRETOS E HIETOGRAMAS DE PRECIPITAÇÃO ÚTIL RESULTANTES DO MÉTODO DA SOBREPOSIÇÃO DOS ACONTECIMENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS E COM AS PERDAS CALCULADAS COM DOIS MÉTODOS ALTERNATIVOS (SCS E ÍNDICE Φ), ASSOCIADOS ÀS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL.	144
FIGURA 4.22 – HIDROGRAMAS UNITÁRIOS OBSERVADOS FINAIS, SEGUNDO OS MÉTODOS GRÁFICO E DA SOBREPOSIÇÃO DOS ACONTECIMENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS PARA AS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DA CAMILAS LAVEIRAS, PONTE PINHAL, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL E SENHORA DA ROCHA.	146
FIGURA 4.23 – DIAGRAMAS TEMPO-ÁREA PARA AS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS CONSIDERANDO APLICAÇÃO DOS MÉTODOS HIDROLÓGICO (KIRPICH E HUGGINS E BURNEY) OU HIDRÁULICO (LIU, ET AL., 2003, DUAS VERSÕES).	149
FIGURA 4.24 – COMPARAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS AGREGADOS FINAIS DE CLARK, PARA AS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DA CAMILAS LAVEIRAS, PONTE PINHAL, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL E SENHORA DA ROCHA (CONTINUA).	152
FIGURA 4.24 – COMPARAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS AGREGADOS FINAIS DE CLARK, PARA AS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DA CAMILAS LAVEIRAS, PONTE PINHAL, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL E SENHORA DA ROCHA (CONTINUAÇÃO).	153
FIGURA 4.25 – HIDROGRAMAS UNITÁRIO SINTÉTICOS ADIMENSIONAIS PADRONIZADOS.	154
FIGURA 4.26 – COMPARAÇÃO DOS TEMPOS DE CONCENTRAÇÃO E DE ATRASO.	155
FIGURA 4.27 HIDROGRAMAS UNITÁRIOS OBSERVADOS AJUSTADOS À FUNÇÃO GAMA E QUE SUPORTAM À DETERMINAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESPECÍFICOS (CONTINUA).	156
FIGURA 4.27 HIDROGRAMAS UNITÁRIOS OBSERVADOS AJUSTADOS À FUNÇÃO GAMA E QUE SUPORTAM À DETERMINAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESPECÍFICOS (CONTINUAÇÃO).	157
FIGURA 4.28 – HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESPECÍFICOS PARA CADA BACIA HIDROGRÁFICA.	157
FIGURA 4.29 – COMPARAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESPECÍFICO E SINTÉTICOS APLICÁVEIS À REGIÃO.	162
FIGURA 4.30 - HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS SEGUNDO TEMEZ E MOCKUS, PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ANÁLISE.	163
FIGURA 4.31 – COMPARAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS SINTÉTICOS.	164
FIGURA 5.1 – REPRESENTAÇÃO DO MODELO DE ESCOAMENTO DE BASE EXPONENCIAL (ADAPTADO DE HEC-HMS, 2000).	170
FIGURA 5.2 –INTENSIDADES DE PRECIPITAÇÃO HORÁRIAS MÉDIAS CALIBRADAS E NÃO CALIBRADAS, ASSOCIADAS ÀS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS, DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA, PONTE ZAMBUJAL, PONTE PINHAL E COLARES, COM VALORES MÉDIOS EM ÁREA ESTIMADOS POR IDW2-6 E POR POLÍGONOS DE THIESSEN.	172
FIGURA 5.3 – ESTIMATIVAS DA PRECIPITAÇÃO TOTAL ASSOCIADA AOS ACONTECIMENTOS PLUVIOSOS SELECIONADOS PARA A MODELAÇÃO HIDROLÓGICA DAS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS, DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA, PONTE ZAMBUJAL, PONTE PINHAL E COLARES, UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA EM ÁREA.	174
FIGURA 5.4 – EXEMPLOS DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS E DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DOS POLÍGONOS DE THIESSEN, COM BONS RESULTADOS NO PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO NASH-SUTCLIFFE, ASSOCIADA À BACIA HIDROGRÁFICA DEFINIDA NA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE QUINTA DAS CAMILAS.	186
FIGURA 5.5 – EXEMPLOS DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS E DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DOS POLÍGONOS DE THIESSEN, COM BONS RESULTADOS NO PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO NASH-SUTCLIFFE, ASSOCIADA À BACIA HIDROGRÁFICA DEFINIDA NA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DA ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL.	187
FIGURA 5.6 – EXEMPLOS DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS E DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DOS POLÍGONOS DE THIESSEN, COM BONS RESULTADOS NO PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO NASH-SUTCLIFFE, ASSOCIADA À BACIA HIDROGRÁFICA DEFINIDA NA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE LAVEIRAS.	188
FIGURA 5.7 – EXEMPLOS DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS E DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DOS POLÍGONOS DE THIESSEN, COM BONS RESULTADOS NO PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO NASH-SUTCLIFFE, ASSOCIADA À BACIA HIDROGRÁFICA DEFINIDA NA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE SENHORA DA ROCHA.	189
FIGURA 5.8 – EXEMPLOS DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS E DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DOS POLÍGONOS DE THIESSEN, COM BONS RESULTADOS NO PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO NASH-SUTCLIFFE, ASSOCIADA À BACIA HIDROGRÁFICA DEFINIDA NA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE PONTE PINHAL.	190
FIGURA 5.9 – EXEMPLOS DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS E DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DOS POLÍGONOS DE THIESSEN E DO RADAR METEOROLÓGICO CALIBRADO (R_{TP} E R_{IDW}), COM BONS	

RESULTADOS NOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO, ASSOCIADA À BACIA HIDROGRÁFICA DEFINIDA NA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE QUINTA DAS CAMILAS.	195
FIGURA 5.10 – EXEMPLOS DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS E DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DOS POLÍGONOS DE THIESSEN E DO RADAR METEOROLÓGICO CALIBRADO (R_TP E R_IDW), COM BONS RESULTADOS NOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO, ASSOCIADA À BACIA HIDROGRÁFICA DEFINIDA NA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DA ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL.	196
FIGURA 5.11 – EXEMPLOS DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS E DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DOS POLÍGONOS DE THIESSEN E DO RADAR METEOROLÓGICO CALIBRADO (R_TP E R_IDW), COM BONS RESULTADOS NOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO, ASSOCIADA À BACIA HIDROGRÁFICA DEFINIDA NA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE LAVEIRAS.	197
FIGURA 5.12 – EXEMPLOS DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS E DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DOS POLÍGONOS DE THIESSEN E DO RADAR METEOROLÓGICO CALIBRADO (R_TP E R_IDW), COM BONS RESULTADOS NOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO, ASSOCIADA À BACIA HIDROGRÁFICA DEFINIDA NA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE SENHORA DA ROCHA.	198
FIGURA 5.13 – EXEMPLOS DE HIDROGRAMAS OBSERVADOS E SIMULADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS E DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DOS POLÍGONOS DE THIESSEN E DO RADAR METEOROLÓGICO CALIBRADO (R_TP E R_IDW), COM BONS RESULTADOS NOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO, ASSOCIADA À BACIA HIDROGRÁFICA DEFINIDA NA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE PONTE PINHAL.	199
FIGURA 5.14 – RELAÇÕES ENTRE OS CAUDAIS OBSERVADOS E OS SIMULADOS RECORRENDO AOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS DE TEMEZ E ESPECÍFICO.	202
FIGURA 5.15 – MÓDULOS DO SVARH: A) AQUISIÇÃO DE DADOS, B) CENTRAL DE COMANDO E C) DISPONIBILIZAÇÃO DE DADOS.	204
FIGURA 5.16 – SINÓPTICOS DO SVARH ASSOCIADOS À ZONA METROPOLITANA DE LISBOA, COM OS REGISTOS EFETUADOS DURANTE A CHEIA DE 18 DE FEVEREIRO DE 2008 (ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE SÃO JULIÃO DO TOJAL E ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE PONTE PINHAL).	205

Índice de Quadros

QUADRO 1.1 – CATÁSTROFES NATURAIS EM-DAT (PERÍODO DE ANÁLISE 1900-2015).	4
QUADRO 2.1 - CARACTERÍSTICAS FISIográficas DAS 15 BACIAS HIDROGRÁFICAS: ÁREA DA BACIA HIDROGRÁFICA (A), ALTITUDE MÍNIMA DA BACIA HIDROGRÁFICA (Z_{\min}), ALTITUDE MÉDIA DA BACIA HIDROGRÁFICA (Z_m), DECLIVE MÉDIO DA BACIA HIDROGRÁFICA (γ), COMPRIMENTO DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL (L_{ca}), COMPRIMENTO DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL PROLONGADO ATÉ À LINHA DE CUMEADA (L), DECLIVE MÉDIO DO CURSO DE ÁGUA PRINCIPAL (J) E NÚMERO DE ESCOAMENTO (N).	10
QUADRO 2.2 - IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DA AUTORIDADE NACIONAL DA ÁGUA.	13
QUADRO 2.3 – IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO IPMA, I.P.	14
QUADRO 2.4 - IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DA AUTORIDADE NACIONAL DA ÁGUA.	15
QUADRO 2.5 - AVALIAÇÃO DAS FALHAS DE REGISTO DAS 16 ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO NOS CINCO PERÍODOS TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO.	18
QUADRO 2.6 - AVALIAÇÃO DAS FALHAS DE REGISTO DAS 17 ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO (IPMA, I.P.) NOS CINCO PERÍODOS TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO.	19
QUADRO 2.7 - EVENTOS CHUVOSOS SELECIONADOS PARA COMPARAÇÃO E CALIBRAÇÃO COM A INFORMAÇÃO DO RADAR EM CRUZ DO LEÃO. ...	19
QUADRO 2.8 - AVALIAÇÃO DAS FALHAS DE REGISTO DAS SETE ESTAÇÕES DE HIDROMÉTRICAS NOS CINCO PERÍODOS TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO.	20
QUADRO 2.9 – IDENTIFICAÇÃO DOS ACONTECIMENTOS PLUVIOSOS EM CADA EVENTO CHUVOSO ASSOCIADO ÀS SETE ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS.	21
QUADRO 2.10 – INFORMAÇÃO COMPLEMENTAR RELEVANTE ASSOCIADA ÀS SETE ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS.	24
QUADRO 2.11 – NOVAS CURVAS DE VAZÃO (QUINTA DAS CAMILAS) OU NOVOS TROÇOS DE CURVAS DE VAZÃO (ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL).	26
QUADRO 2.12 – DADOS DO RADAR METEOROLÓGICO EM CRUZ DO LEÃO.	29
QUADRO 2.13 – TIPOLOGIAS (VER CARACTERIZAÇÃO NO ANEXO 7) PARA ESTIMAR A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO ASSOCIADAS AOS EVENTOS CHUVOSOS.	34
QUADRO 3.1 - RELAÇÃO DE VALORES DE Z EXPRESSOS EM DUAS UNIDADES E SUA CORRESPONDÊNCIA COM OS VALORES DE R (VALORES APROXIMADOS) (ADAPTADO DE MIRANDA, 2013).	50
QUADRO 3.2 – ATENUAÇÃO DA INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO, R (mm h^{-1}), EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA DE FUNCIONAMENTO DO RADAR METEOROLÓGICO E DA SUA DISTÂNCIA AO ALVO METEOROLÓGICO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION- WMO, 2010 E GUNN E EAST, 1954, CIT. POR COLLIER, 1989).	54
QUADRO 3.3 – SÍNTESE DOS ESTUDOS CONSULTADOS SOBRE A CALIBRAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR RADARES METEOROLÓGICOS (INTERNACIONAIS)	59
QUADRO 3.4 – SÍNTESE DOS ESTUDOS CONSULTADOS SOBRE A CALIBRAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR RADARES METEOROLÓGICOS (NACIONAIS)	66
QUADRO 3.5 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO RADAR EM CRUZ DO LEÃO (CORUCHE).	70
QUADRO 3.6 – VALORES DE RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO, $REQM$, ERRO RELATIVO MÉDIO, ERM , COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO, R , E COVARIÂNCIA, COV , ASSOCIADOS ÀS RELAÇÕES PONTUAIS $U - R$.	77
QUADRO 3.7 – VALORES DE RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO, $REQM$, ERRO RELATIVO MÉDIO, ERM , COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO, R , E COVARIÂNCIA, COV , ASSOCIADOS ÀS RELAÇÕES PONTUAIS $U - R$ TIPO 1 E TIPO 2 MELHORADA.	79
QUADRO 3.8 – CONSTANTES A E B DAS RELAÇÕES $U - R_{\text{ESTACÃO}}$ DE MONITORIZAÇÃO E ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DO SEU AJUSTAMENTO, PARA AS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS NA ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA (EM QUE $REQM$ = RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO E ERM = ERRO RELATIVO MÉDIO).	82
QUADRO 3.9 – VALORES DE RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO, $REQM$ E ERRO RELATIVO MÉDIO, ERM , ASSOCIADOS ÀS RELAÇÕES $U - R_{\text{ÁREA}}$.	85
QUADRO 3.10 – RELAÇÕES $Z - R$ RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO DOS SINAIS RECEBIDOS (ECOS) DO RADAR METEOROLÓGICO PARA ESTIMAR A INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO, SENDO Z E R EXPRESSOS, RESPECTIVAMENTE, POR $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ E EM mm h^{-1} .	87
QUADRO 3.11 – ALGUMAS RELAÇÕES $Z - R$ OBTIDAS NESTE ESTUDO.	88
QUADRO 4.1 – CLASSES DAS CONDIÇÕES ANTECEDENTES DE HUMIDADE (ADAPTADO DE SCS, 1972).	101
QUADRO 4.2 - COORDENADAS ADIMENSIONAIS DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS DO SOIL CONSERVATION SERVICE CURVILÍNEO (SCS, 1972 E HOGGAN, 1989 E TRIANGULAR OU MOCKUS (SCS, 1972).	110
QUADRO 4.3A - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO HIDROGRAMA DE CLARK: (1) DIAGRAMA TEMPO-ÁREA.	117
QUADRO 4.3B – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO HIDROGRAMA DE CLARK: (2) HIETOGAMA DE PRECIPITAÇÃO ÚTIL, HOMOGÉNEA SOBRE A BACIA, DIVIDIDA EM TRÊS ISÓCRONAS θ (PERÍODO).	117
QUADRO 4.3C – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO HIDROGRAMA DE CLARK: (3) DETERMINAÇÃO DOS CAUDAIS AFLUENTES (Q_a) E EFLUENTES (Q_e) CONSIDERANDO O COEFICIENTE DE PROPAGAÇÃO (C) DE $0,481 \text{ h}^{-1}$, QUE CORRESPONDE AO COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO (K) DE $1,578 \text{ h}$, O DIAGRAMA TEMPO-ÁREA DO QUADRO 4.3A E O HIETOGAMA DE PRECIPITAÇÃO ÚTIL DO QUADRO 4.3B.	117
QUADRO 4.4 - VELOCIDADES MÉDIAS (m s^{-1}) APROXIMADAS, PARA CÁLCULO DO TEMPO DE PERCURSO DO ESCOAMENTO (ADAPTADO DE CHOW, ET AL., 1988).	122
QUADRO 4.5 - COEFICIENTES DE MANNING - N (ADAPTADO DE MCCUEN, 1996, CHOW, 1988, USUL E YILMAZ, 2002).	123

QUADRO 4.6 – LIMITES DAS CLASSES DE CÉLULAS ACUMULADAS E VALORES DE RAIOS HIDRÁULICO PROPOSTOS POR USUL E YILMAZ (2002).	125
QUADRO 4.7 – CONSTANTES AJUSTADAS DA EQUAÇÃO 4.51.	126
QUADRO 4.8 – VALORES DE RAIOS HIDRÁULICO PROPOSTOS POR SCHRÖDER (2007) E OBTIDOS COM BASE NAS MEDIÇÕES DE CAUDAL E DETERMINADOS CONSIDERANDO A GEOMETRIA DAS SECÇÕES DAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS.	127
QUADRO 4.9 – CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DOS HIDROGRAMAS TOTAIS ASSOCIADAS ÀS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS ANALISADAS (MÉDIA E DESVIO-PADRÃO).	138
QUADRO 4.10 – CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS RESULTANTES DA DETERMINAÇÃO DOS HIDROGRAMAS DE ESCOAMENTO DIRETOS ASSOCIADAS ÀS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS ANALISADAS (MÉDIA E DESVIO-PADRÃO).	139
QUADRO 4.11 – CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS RESULTANTES DA DETERMINAÇÃO DOS HIDROGRAMAS DE ESCOAMENTO DIRETOS ASSOCIADAS ÀS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS ANALISADAS (MÉDIA E DESVIO-PADRÃO).	142
QUADRO 4.12 – CAUDAIS DE PONTA DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS OBSERVADOS FINAIS, COM DIMENSÕES, U_p ($M^3 s^{-1}$ POR MM H^{-1}), E SEM DIMENSÕES, δ_p , ASSOCIADOS A CADA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA, SEGUNDO O MÉTODO GRÁFICO E DE SOBREPOSIÇÃO DOS ACONTECIMENTOS E PARA DOIS TIPOS DE MODELAÇÃO DAS PERDAS.	143
QUADRO 4.13 – TEMPOS CARACTERÍSTICOS DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS OBSERVADOS FINAIS (H).	143
QUADRO 4.14 – TEMPO DE CONCENTRAÇÃO, T_c , E DURAÇÃO TOTAL DO DIAGRAMA TEMPO-ÁREA, CONSOANTE O MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DAS ISÓCRONAS.	148
QUADRO 4.15 – TEMPO PARA A PONTA (T_p), CONSTANTE DE RESERVATÓRIO OU COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO MÉDIO (K) E CAUDAL DE PONTA (Q_p) DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS AGREGADOS DE CLARK, ASSOCIADOS AOS DOIS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE PERDAS E AOS VÁRIOS PROCESSOS DE CÁLCULO DAS ISÓCRONAS.	150
QUADRO 4.16 – FATOR DE FORMA DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE GAMA (K_G), ASSOCIADA ÀS BACIAS DEFINIDAS EM QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL.	156
QUADRO 4.17 – CARACTERÍSTICAS FIOGRÁFICAS ASSOCIADAS ÀS BACIAS DEFINIDAS EM QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA, PONTE ZAMBUJAL E PONTE PINHAL E COLARES.	158
QUADRO 4.18 – CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS ASSOCIADAS ÀS BACIAS DEFINIDAS EM QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA, PONTE ZAMBUJAL E PONTE PINHAL E COLARES.	158
QUADRO 4.19 – VALORES DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO, R .	159
QUADRO 4.20 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO TESTE F (Eq. (4.59b)), COM O RECURSO AO PROGRAMA DE EXCEL OPÇÃO TESTE F : DUAS AMOSTRAS PARA VARIÂNCIAS, PARA UMA SIGNIFICÂNCIA DE 0,05, PARA O FATOR DE FORMA DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE GAMA (K_G), O TEMPO DE BASE DO HIDROGRAMA UNITÁRIO (T_B), CAUDAL DE PONTA DO HIDROGRAMA UNITÁRIO (Q_p) E A RELAÇÃO T_p/T_B , CONSIDERANDO INDIVIDUALMENTE CADA UMA DAS SEIS CARACTERÍSTICAS FIOGRÁFICAS. O NÚMERO DE OBSERVAÇÕES (N_x) E O GRAU DE LIBERDADE (G_L), DAS SÉRIES DAS CARACTERÍSTICAS FIOGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS, É IGUAL A 5 E 4 RESPECTIVAMENTE.	160
QUADRO 4.21 – COMBINAÇÕES TESTADAS VISANDO OBTENIR AS QUE MELHOR ESTIMAM AS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS.	161
QUADRO 4.22 – COEFICIENTES C_i DA EQ. (4.57) QUE RELACIONAM AS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS (VARIÁVEIS DEPENDENTES) E AS CARACTERÍSTICAS FIOGRÁFICAS (VARIÁVEIS INDEPENDENTES). RESULTADO DO MÉTODO <i>BACKWARD ELIMINATION</i> (A_1 IGUAL A 0,05).	161
QUADRO 4.23 – COEFICIENTES C_i DA EQ. (4.57) QUE RELACIONAM AS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS (VARIÁVEIS DEPENDENTES) E AS CARACTERÍSTICAS FIOGRÁFICAS (VARIÁVEIS INDEPENDENTES). RESULTADO DO MÉTODO <i>STEPWISE REGRESSION</i> (A_1 IGUAL A 0,05).	163
QUADRO 5.1 – SÍNTESE DOS CENÁRIOS A INCLUIR NA MODELAÇÃO (SIMULAÇÃO) PARA AS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ANÁLISE.	175
QUADRO 5.2 – CARACTERÍSTICAS FIOGRÁFICAS DAS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ANÁLISE E A UTILIZAR NA MODELAÇÃO.	176
QUADRO 5.3 – CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DE BASE MÉDIAS DAS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ANÁLISE E A UTILIZAR NA MODELAÇÃO.	176
QUADRO 5.4 – CARACTERÍSTICAS MÉDIAS SOBRE AS PERDAS DAS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ANÁLISE E A UTILIZAR NA MODELAÇÃO.	177
QUADRO 5.5 – TEMPOS DE ATRASO DAS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS, ASSOCIADOS AO SCS, VALORES A UTILIZAR NA MODELAÇÃO.	177
QUADRO 5.6 – HIDROGRAMAS UNITÁRIOS OBSERVADOS, CLARK E ESPECÍFICOS, DETERMINADOS PARA AS CINCO BACIAS HIDROGRÁFICAS ANALISADAS, DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL.	179
QUADRO 5.7 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DOS HIDROGRAMAS OBSERVADOS A PARTIR DOS HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL (SR, MRA, SQR E NS).	183
QUADRO 5.8 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DOS HIDROGRAMAS OBSERVADOS A PARTIR DOS CINCO HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL (PEQ_p E PET_p).	184
QUADRO 5.9 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS DA AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DOS HIDROGRAMAS OBSERVADOS A PARTIR DOS CINCO HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS, COM CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE PRECIPITAÇÃO OBTIDA PELO RADAR CALIBRADO COM OS POLÍGONOS DE THIESSEN, PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL (SR, MRA, SQR E NS).	191
QUADRO 5.10 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS DA AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DOS HIDROGRAMAS OBSERVADOS A PARTIR DOS CINCO HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS, COM CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE PRECIPITAÇÃO OBTIDA PELO RADAR CALIBRADO COM OS POLÍGONOS DE THIESSEN, PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL (PEQ_p E PET_p).	192

QUADRO 5.11 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS DA AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DOS HIDROGRAMAS OBSERVADOS A PARTIR DOS CINCO HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS, COM CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE PRECIPITAÇÃO OBTIDA PELO RADAR CALIBRADO COM <i>INVERSE DISTANCE WEIGHTED</i> , PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL (SR, MRA, SQR E NS).	192
QUADRO 5.12 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS DA AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DOS HIDROGRAMAS OBSERVADOS A PARTIR DOS CINCO HIDROGRAMAS UNITÁRIOS ESTIMADOS, COM CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE PRECIPITAÇÃO OBTIDA PELO RADAR CALIBRADO COM <i>INVERSE DISTANCE WEIGHTED</i> , PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL (PEQ _p E PET _p).	193
QUADRO 5.13 – RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO, CONSIDERANDO A PRECIPITAÇÃO PONDERADA OBTIDA PELOS POLÍGONOS DE THIESSEN, CALIBRAÇÃO DO RADAR COM TP E IDW, PARA AS CINCO BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL.	193
QUADRO 5.14 – CAUDAIS DE PONTA OBSERVADOS E SIMULADOS, NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA, PONTE ZAMBUJAL, PONTE PINHAL E COLARES (CONTINUA).	200
QUADRO 5.14 – CAUDAIS DE PONTA OBSERVADOS E SIMULADOS, NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA, PONTE ZAMBUJAL, PONTE PINHAL E COLARES (CONTINUAÇÃO).	201
QUADRO 5.15 – DESCRITORES ESTATÍSTICOS DA ESTATÍSTICA DE AVALIAÇÃO DO AJUSTAMENTO PET _p , ASSOCIADOS ÀS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL.	202
QUADRO 5.16 – CAUDAIS MÁXIMOS INSTANTÂNEOS SIMULADOS PARA OS ANOS HIDROLÓGICOS 2007/08, 2006/07, 2005/06 E 2003/04, ASSOCIADOS ÀS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS NAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS DE PONTE ZAMBUJAL E DE COLARES.	203
QUADRO 5.17 – MODELOS HIDROLÓGICOS DE PREVISÃO DESENVOLVIDOS NO ÂMBITO DO SVARH PARA A ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA.	204

Símbolo	Descrição ou designação	Unidades
A	Área (total) da bacia hidrográfica	km ²
A_a	Área acumulada da bacia hidrográfica	km ²
A_e	Abertura efetiva da antena	cm ²
A_d	Área de drenagem	km ²
A_{dc}	Área do coletor do disdrômetro	m ²
A_i	Área de influência de cada estação i	m ²
A_{no}	Área de influência de cada nó	m ²
A_u	Área urbana	%
A_θ	Área parcelar da bacia hidrográfica	km ²
a, b	Constantes da relação $Z-R$	(-)
a_1, b_1	Constantes de Liu, <i>et al.</i> (2003)	(-)
a_r, b_r	Constantes da regressão linear entre as precipitações anuais homogêneas (variável independente) e as precipitações anuais da série em análise (variável dependente).	(-)
A, B	Constantes da relação $U-R$	(-)
B_{smp}	Média do viés	dB
C	Coefficiente de propagação do reservatório linear (Clark)	(-)
C_e	Coefficiente de escoamento	(-)
$C_o(n,p)$	Combinações entre o número total de características fisiográficas avaliadas (n) agrupadas num conjunto menor de características fisiográficas (p)	(-)
C_r	Constante do radar (Eq. 3.5)	(-)
Cov	Covariância	(-)
c_i	Coefficientes associados às variáveis independentes i	(-)
D	Duração ou intervalo de tempo da precipitação útil do hidrograma unitário	h
D_0	Tamanho mediano do diâmetro da distribuição do hidrometeoro	mm
D_i	Diâmetro do hidrometeoro ou partícula i	cm
D_u	Distâncias entre o radar e as estações udográficas	km
D_{di}	Somatório das diferenças entre a precipitação na estação udográfica e o valor mais próximo na matriz $F1$	mm
D_1	Intervalo de tempo do hietograma e do hidrograma	h
d_i	Distância euclidiana entre o nó e a estação de monitorização i	m
E_d	Altura acumulada de escoamento direto	mm
EP	Densidade da rede de monitorização	(km ²)
ERM	Erro Relativo Médio	%
e	Número de Euler igual a 2,7183	(-)
e_i	Resíduos observados	mm
$F1, F2$	Estimativas de precipitação na célula da matriz do radar	mm
$F_{critico}$	Valor crítico do Teste-f	(-)
f	Expoente da potência	(-)
$f(x)$	Função densidade de probabilidade da distribuição F de <i>Snedecor</i>	(-)
G	Ganho real da antena do radar em relação a uma antena isotrópica	(-)
g_l	Graus de liberdade	(-)
g_{ln}	Graus de liberdade do numerador	(-)
g_{ld}	Graus de liberdade do denominador	(-)
H	Número de tempos de percurso	(-)
H_t	Altura central do feixe do radar	km
h_i	Comprimento do impulso de duração t	m
H_o	Hipótese nula	(-)
h	Altura hidrométrica	m
I_a	Perdas iniciais	mm
i_u	Intensidade de precipitação útil	mm h ⁻¹

Símbolo	Descrição ou designação	Unidades
J	Declive médio do curso de água principal	(-)
J_i	Declive do leito do curso de água	(-)
K	Constante temporal do reservatório linear ou coeficiente de armazenamento	h
\overline{K}	Coeficiente de armazenamento médio para cada bacia hidrográfica	h
K_g	Fator de forma da função de densidade de probabilidade Gama	(-)
K_r	Índice de refração	(-)
K_m	Coeficiente de Manning-Strickler	$m^{1/3} s^{-1}$
L	Comprimento da bacia hidrográfica definido pelo comprimento do curso de água principal até à cumeada ou cabeceira (SCS)	km ou m
L_{ca}	Comprimento do curso de água principal deste a nascente à seção de referência	km
L_s	Percurso médio de escoamento superficial	m
L_t	Somatório de todas as perdas	dB km ⁻¹
Δl_i	Comprimento do troço i	m
I	Número de variáveis independentes utilizadas na estimativa	(-)
I_p	Número de picos de caudal do hidrograma de escoamento direto	(-)
M	Memória do Sistema (número de períodos temporal, D) ou Número de ordenadas do hidrograma unitário	(-)
MDS	Sinal mínimo detetável	dBm
m	Número de períodos utilizados na calibração do hidrograma unitário	(-)
m_r	Índice de refração complexo (do hidrometeoro)	(-)
m_d	Períodos do caudal direto	(-)
m_p	Períodos de precipitação útil	(-)
N	Número de Escoamento	(-)
$N(D)$	Número de hidrometeoros por unidade de volume de ar por milímetro de intervalo	mm ⁻¹ m ⁻³
N_0	Coeficiente de interceção ou linear	m ⁻³ mm ⁻¹
N_d	Número de períodos temporal (D) do hidrograma do escoamento direto	(-)
N_e	Número de estações de monitorização	(-)
N_{no}	Número de nós	(-)
N_p	Duração do escoamento direto após a ponta de cheia	dias
N_q	Número de ordenadas do hidrograma simulado	(-)
N_{Pu}	Número de períodos temporal (D) do acontecimento pluvioso útil	(-)
N_s	Número de acontecimentos hidrometeorológicos	(-)
N_t	Número total de instantes horários analisados	(-)
N_x	Número de valores da série de dados (tamanho da amostra) ou número de total das seções	(-)
n	Coeficiente de rugosidade de Manning	m ^{-1/3} s
n_o	Nó da malha regular espacial sobreposta à bacia hidrográfica	(-)
n_p	Número de partículas	(-)
n_{pi}	Número de picos no período simulado	(-)
o	Número de variáveis independentes a considerar (características fisiográficas das bacias hidrográficas)	(-)
\hat{P}_{ai}	Precipitação anual estimada do ano i	mm
P_{ahi}	Precipitação anual do ano i da série anual homogénea	mm
$\overline{P_r}$	Potência média recebida pelo radar	W
$P()$	Função densidade de probabilidade	(-)
P	Altura da precipitação total	mm
P_A	Precipitação média em área	mm
P_{ai}	Precipitação anual do ano i	mm
P_a	Altura de precipitação calibrada na matriz do radar	mm
P_{rad}	Altura de precipitação estimada pelo radar	mm

Símbolo	Descrição ou designação	Unidades
P_i	Altura da precipitação observada na estação i	mm
P_g	Altura de precipitação registada no udógrafo	mm
P_{no}	Altura da precipitação em cada nó	mm
P_t	Potência máxima de transmissão do radar	W
\hat{P}_u	Volume (altura) de precipitação útil estimado	mm
P_u	Volume (altura) de precipitação útil	mm
\bar{p}_u	Intensidade média de precipitação útil	mm h ⁻¹
ρ_i	Peso de cada estação de monitorização i	(-)
Q	Caudal	m ³ s ⁻¹
Q_a	Caudal afluente	m ³ s ⁻¹
\overline{Q}_{ar}	Caudal afluente médio	m ³ s ⁻¹
Q_{b0}	Caudal de base no instante temporal 0 (zero)	m ³ s ⁻¹
Q_{bt}	Caudal de base no instante temporal t	m ³ s ⁻¹
\hat{Q}_u	Caudal associado ao escoamento direto estimado	m ³ s ⁻¹
Q_d	Caudal associado ao escoamento direto	m ³ s ⁻¹
Q_e	Caudal efluente	m ³ s ⁻¹
Q_{ob}	Caudal observado	m ³ s ⁻¹
Q_{si}	Caudal simulado	m ³ s ⁻¹
Q_{pob}	Caudal de ponta máximo observado	m ³ s ⁻¹
Q_{psi}	Caudal de ponta máximo simulado	m ³ s ⁻¹
\overline{Q}_{ob}	Caudal médio observado no período temporal em análise	m ³ s ⁻¹
\overline{Q}_{er}	Caudal efluente médio	m ³ s ⁻¹
Q_r	Caudal de início de recessão	m ³ s ⁻¹
Q_p	Caudal de ponta de cheia do hidrograma total	m ³ s ⁻¹
Q_{qs}	Valor simulado da relação q/q_p Função Gama	(-)
q	Caudal instantâneo do hidrograma unitário	m ³ s ⁻¹
q_p	Caudal máximo ou de ponta do hidrograma unitário	m ³ s ⁻¹ por mm
q_{pc}	Pico de caudal	h ⁻¹
\overline{R}	Média da intensidade de precipitação estimada pelo radar	m ³ s ⁻¹
R	Intensidade de precipitação estimada pelo radar	mm h ⁻¹
R_d	Intensidade de precipitação medida nos disdrómetros	mm h ⁻¹
REQM	Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio	mm h ⁻¹ ou h
R_h	Raio hidráulico	m
R'	Raio efetivo da terra	km
R_{terra}	Raio da Terra	km
r	Coefficiente de correlação amostral segundo Pearson	(-)
r_d	Distância a que se encontram as partículas (hidrometeoro)	km
r^2	Coefficiente de determinação (quadrado do coeficiente de regressão)	(-)
S	Retenção ou capacidade de armazenamento potencial máximo de água no solo da bacia hidrográfica	mm
S_e	Desvio-padrão dos resíduos	mm
SQD	Soma dos Quadrados das Diferenças	m ³ s ⁻¹
\hat{S}_u	Desvio-padrão da intensidade de precipitação estimada para os udógrafos	mm h ⁻¹
S_R	Desvio-padrão da intensidade da precipitação estimada pelo radar	mm h ⁻¹
S_x	Desvio-padrão das variáveis independentes	
S_y	Desvio-padrão das variáveis dependentes	
T_p	Tempo para a ponta do hidrograma de escoamento direto	h
T_{psi}	Tempo para os picos simulados	h
T_{pob}	Tempo para os picos observados	h

Símbolo	Descrição ou designação	Unidades
t	Tempo de percurso do escoamento ou tempo instantâneo selecionado	s ou h
t	Instante t	Unidades de tempo
t_0	Início do instante considerado (instante igual a zero)	Unidades de tempo
t_b	Tempo de base	h
t_c	Tempo de concentração	h
t_{cSCS}	Tempo de concentração segundo SCS	h
t_{cT}	Tempo de concentração segundo Temez	h
t_e	Tempo estimado por IDW	h
t_o	Tempo estimado pelas Eqs. (4.46) e (4.47)	h
t_i	Tempo para o ponto de inflexão do hidrograma unitário	h
t_l	Tempo de resposta ou de atraso do hidrograma do escoamento direto	h
t_p	Tempo para a ponta ou de crescimento do hidrograma unitário	h
\overline{U}	Média da intensidade de precipitação estimada para os udógrafos	mm h ⁻¹
\hat{U}	Intensidade de precipitação estimada através da relação U - R	mm h ⁻¹
\overline{U}	Média da intensidade de precipitação para os udógrafos	mm h ⁻¹
U	Intensidade de precipitação observada nos udógrafos	mm h ⁻¹
u	Ordenadas do hidrograma unitário	m ³ s ⁻¹ por mm ou m ³ s ⁻¹ por mm h ⁻¹
u_p	Caudal de ponta de cheia do hidrograma unitário obtido pelo método de convolução	m ³ s ⁻¹
V_q	Volume do hidrograma unitário específico	Unidades volumétricas
V_t	Volume armazenado no reservatório	m ³
v	Velocidade	m s ⁻¹
v_i	Velocidade de escoamento no troço i	m s ⁻¹
W	Largura e altitude do feixe do radar	km
W_i	Fator ou peso de ponderação	(-)
W_k	Peso à posteriori a determinar pela configuração dos dados da rede	(-)
w	Número de variáveis independentes a considerar (características fisiográficas das bacias hidrográficas)	(-)
x, y	Valor de uma característica hidrológica ou de uma característica fisiográfica	
$\overline{x}, \overline{y}$	Média das características hidrológicas ou das fisiográficas	
\hat{y}_i	Valor estimado da característica hidrológica	
x_i, y_i	Coordenadas da estação de monitorização	Graus ou métrico
x_{no}, y_{no}	Coordenadas do nó da malha regular	Graus ou métrico
Y	Declive médio da bacia hidrográfica	%
Z	Refletividade	cm ⁶ x cm ⁻³ ; mm ⁶ m ⁻³ ; dBZ
Z_{DR}	Refletividade diferencial	dB
Z_H	Refletividade na polarização horizontal	dBZ
Z_m	Altitude média da bacia hidrográfica	M
Z_{min}	Altitude mínima da bacia hidrográfica	M
Z_v	Refletividade na polarização vertical	dBZ
z	Normal padronizada	(-)

Grega

Símbolo	Descrição ou designação	Unidades
ΔV	Volume amostrado pelo impulso	cm ³
γ	Ângulo de elevação da antena do radar ou do radar	Rad; °
α	Coeficiente de exaurimento, de esgotamento ou constante de recessão	h ⁻¹
α_1	Nível de significância	(-)
Δ	Coeficiente angular	mm ⁻¹
ε_k^2	Erro observado normalizado ou padronizado	(-)
η	Rendimento	(-)
θ	Abertura do feixe na horizontal	rad
θ_M	Tempo de concentração da bacia obtido pelo valor máximo da isócrona θ	(h)
θ_i	Desfasamento temporal dos diferentes acontecimentos i	Unidades de tempo
λ	Comprimento de onda da radiação do radar	cm
π	Constante circular	3,141593
ρ_{kl}	Correlação cruzada do erro dos udógrafos k e l	(-)
Φ	Taxa de perdas segundo o método Índice Φ	mm h ⁻¹
φ	Abertura do feixe na vertical	Rad; °
σ_{smp}^2	Variância do viés	dB ²
δ	Ordenadas do hidrograma unitário adimensional	(-)
$\bar{\phi}$	Valor médio do índice Φ para a bacia hidrográfica	mm h ⁻¹
f_θ	fração da área total da bacia	(-)

Acrónimos, Siglas e Abreviaturas

Símbolo	Descrição ou designação
ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
AMC	<i>Antecedent Moisture Condition</i> (condições antecedentes de humidade)
ANOBES	Análise Objetiva Estatística
ANPC	Autoridade Nacional de Proteção Civil
ANOVA	ANalysis Of VAriance
APA, I.P.	Agência Portuguesa do Ambiente, I.P.
AR (*)	Modelo estocástico autorregressivo associado a diversas ordens *
ArcGis	Sistema de Informação Geográfica da empresa ESRI
ARH-Tejo	Administração de Região Hidrográfica do Tejo
ARMA	Modelo estocástico autorregressivo de Média Móvel
CABC	Modelo hidrológico a incorporar no Sistema de Alerta a inundação de São Paulo
CAPPI	<i>Constant Altitude Plan Position Indicator</i>
CCDR	<i>Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional</i>
CGIAR-CSI	<i>Consortium for Spatial Information</i>
COS	Carta de Ocupação do Solo
DSD	<i>Drop Size Distribution</i>
EUMETNET	<i>European Meteorological Service Network</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
HEC-1	<i>Hydrological Engineering Center- Flood Hydrograph Package</i> (USACE)
HEC-HMS	<i>Hydrological Engineering Center- Hydrologic Modeling System</i> (USACE)
HU	Hidrograma unitário
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i> ou inverso do quadrado da distância
IGeoE	Instituto Geográfico do Exército
IM	Instituto de Meteorologia
INAG	Instituto da Água
IPH II	Modelo hidrológico desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas /Universidade Federal do Rio Grande do Sul
IPMA, I.P.	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IRIS	Formato das imagens do radar meteorológico
IST	Instituto Superior Técnico
MDT	Modelo Digital do Terreno (DTM - <i>Digital Terrain Model</i>)
MET	Modelo de Elevação do Terreno (DEM – <i>Digital Elevation Model</i>)
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MRA	Média dos Resíduos absolutos
MOHID	<i>Water Modelling System</i> (copyright by Maretec, IST, 2002)
NEH	<i>National Engineering Handbook</i>
NEXRAD	<i>Next Generation Weather Radar</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NS	Nash-Sutcliffe
NWS	<i>National Weather Service</i>
OPERA	<i>Operational Programme for the Exchange of Weather Radar information</i>
PCAPPI	<i>Pseudo Constant Altitude Plan Position Indicator</i>
PDF	Função de Distribuição Provável
PE	Eco permanente
PEQ _p ,	Percentagem do Erro do caudal de ponta
PET _p	Percentagem do Erro do tempo da ponta
PMM	Método de Correspondência de Probabilidade
PPI	<i>Plan Position Indicator</i>
PPS	<i>Precipitation Processing System</i>
RA	Radar calibrado
RAIN1	Precipitação horária estimada pelo radar meteorológico
RC _{TP}	Radar Calibrado com Polígonos de Thiessen
RC _{IDW}	Radar Calibrado com IDW
ROC	<i>Operation Center Radar</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SEH	<i>Système Hydrologique Européen</i>
SI	Unidades do Sistemas Internacional

Símbolo	Descrição ou designação
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SQR	Somatório do Quadrado dos Resíduos
SR	Soma dos Resíduos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
SVARH	Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos
TP	Polígonos de Thiessen
TR-20	<i>Computer Program for Project Formulation Hydrology (USDA)</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
WMS	<i>Web Map Service</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O ciclo hidrológico descreve os diversos percursos naturais através dos quais a água circula e se transforma, constituindo um sistema de enorme complexidade (Hipólito e Vaz, 2011). O ciclo constitui uma sequência contínua de processos de movimento, armazenamento e mudanças de estado físico, acionada pela radiação solar (Matias, 2006a). A Fig.1.1 descreve esquematicamente os principais movimentos da água do ciclo hidrológico.

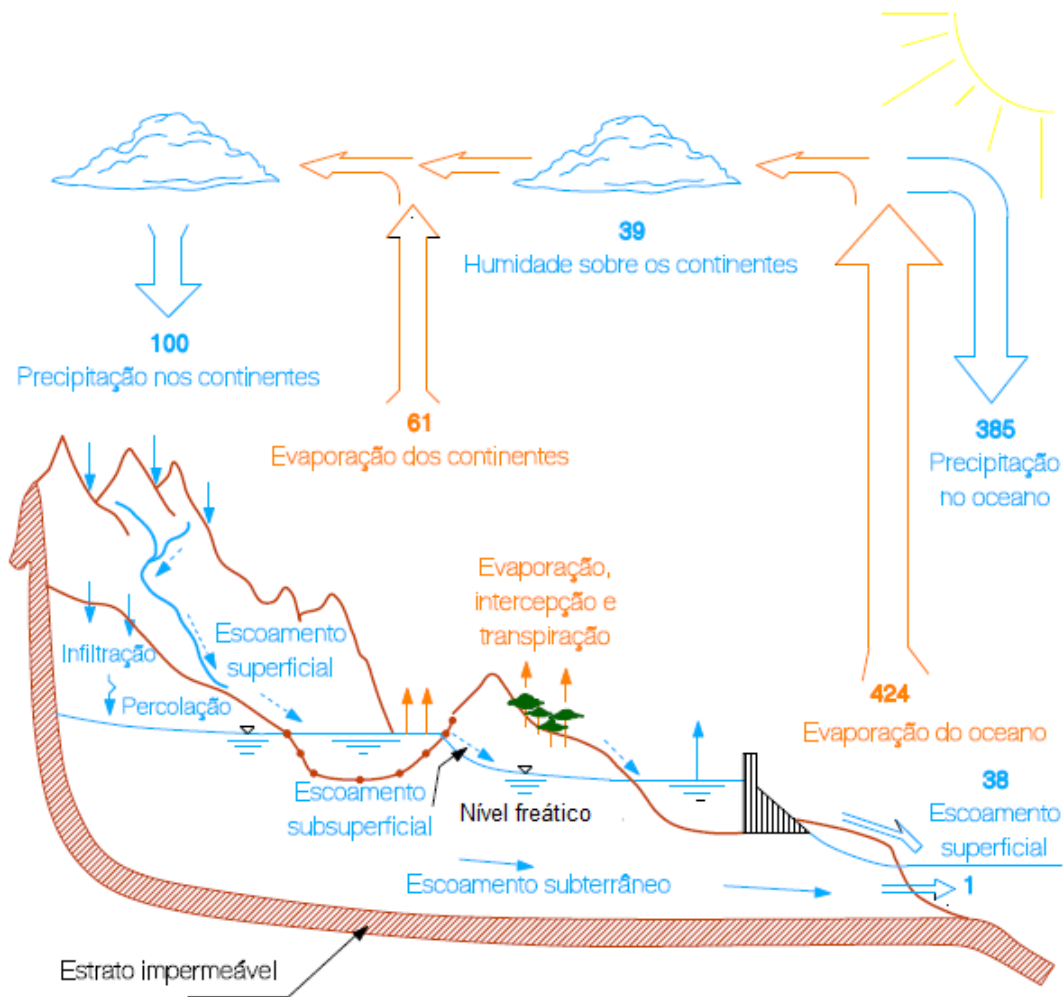


Figura 1.1 – Ciclo hidrológico, com balanço anual médio em unidades relativas a um volume anual de precipitação continental de 100 unidades (adaptado de Matias, 2006a e Chow, 1988).

Os fenómenos hidrológicos são extremamente complexos, não podendo ser totalmente caracterizados, sendo assim, representados de um modo simplificado através do conceito de sistema (Matias, 2006a). Chow, et al. (1988) definem um sistema hidrológico como um volume no espaço, limitado por uma fronteira, que recebe água e outros dados de entrada, opera sobre eles internamente, e produz resultados de saída do sistema (Fig. 1.2). Na maioria dos problemas, apenas alguns dos processos do ciclo hidrológico são representados no sistema, num dado instante, e considerando apenas uma parte da superfície da terra (Matias, 2006a).

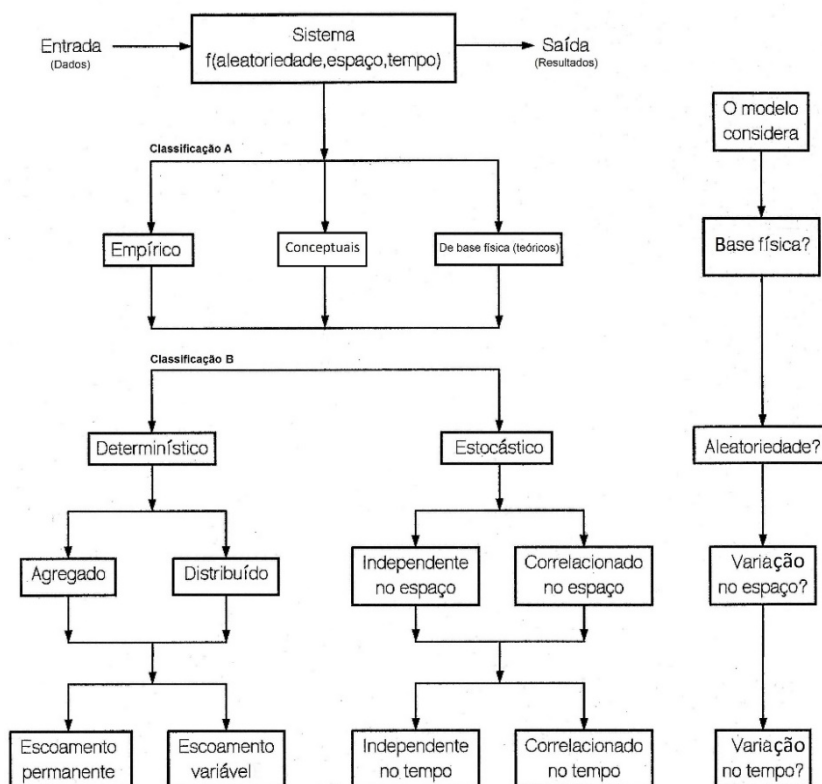


Figura 1.2 – Classificação dos modelos hidrológicos matemáticos (adaptado de Matias, 2006a e Chow, 1988).

Os modelos são representações de determinados processos, com diferentes complexidades, que permitem reproduzir, com maior ou menor aproximação, quantidades de grandezas neles intervenientes (Hipólito, 1985).

Os modelos de processos hidrológicos podem classificar-se em modelos físicos (semelhantes ou analógicos) e modelos matemáticos (Hipólito, 1985). Os modelos físicos utilizam medição e manipulação de grandeza físicas e os modelos matemáticos reproduzem as quantidades e as relações relevantes das variáveis utilizando um conjunto de equações matemáticas. Os modelos matemáticos podem ser classificados no sistema A (Fig. 1.2), consoante a natureza do conjunto de equações matemáticas que interligam as variáveis (teórico, conceptual e empírico), e no sistema B (Fig. 1.2), consoante a natureza das variáveis e parâmetros do modelo (determinístico ou estocástico).

Os modelos determinísticos fornecem previsões (e.g., método do hidrograma unitário ou modelo SHE), enquanto os modelos estocásticos permitem obter prognósticos associados a probabilidades de ocorrência (e.g., os modelos estocásticos autorregressivo, modelos AR, ou modelos estocásticos autorregressivo de média móvel, modelos ARMA).

As cheias podem ser caracterizadas por modelos matemáticos dos tipos seguintes:

- empíricos, sem qualquer suporte de leis da física, podendo recorrer a teorias de outras áreas da ciência, por exemplo, as equações de regressão;
- conceptuais, situados entre os modelos empíricos e de base teórica (determinísticos ou estocásticos), em que existe substituição de componentes teóricas por analógicas, mantendo-se a verificação do princípio da conservação da massa;

- teóricos, que se apoiam, exclusivamente, em leis da física, por exemplo, nos princípios da conservação da massa, da energia e da quantidade de movimento;
- estocásticos, que recorrem à teoria das probabilidades, onde os resultados do sistema são estatisticamente semelhantes aos registos históricos e onde existe uma componente aleatória que se sobrepõe à componente determinística;
- determinísticos, que recorrem ao conceito de causa-efeito, isto é, uma determinada entrada no sistema gera sempre o mesmo resultado, logo sem qualquer aleatoriedade, estando suportados nos princípios dos modelos teóricos.

Os modelos podem ser ainda classificados em função da caracterização das variáveis no espaço e no tempo. Assim, no que se refere ao espaço, os modelos determinísticos podem ser classificados como agregados ou distribuídos, e no que se refere ao tempo, podem ser classificados como estacionários ou não estacionários. Nos modelos estocásticos as variáveis são independentes ou correlacionáveis no espaço e no tempo (Fig. 1.2).

Os modelos determinísticos agregados consideram a bacia hidrográfica como uma área homogénea e sujeita a uma precipitação uniformemente distribuída (o sistema é espacialmente médio). Os modelos distribuídos dividem a bacia em diversas sub-bacias de características homogéneas, que são analisadas de forma independente, sendo os diferentes resultados sobrepostos de forma a obter um valor global.

Independentemente do tipo, os modelos podem ser desenvolvidos para simular um único acontecimento pluvioso (modelo de acontecimento) ou simular em contínuo o balanço de água na bacia hidrográfica (modelo contínuo). A adoção de modelos contínuos não permite algumas simplificações aceitáveis nos modelos de acontecimento, como sejam não considerar a evapotranspiração, a percolação e o escoamento subsuperficial.

Conforme referido, os modelos podem apresentar diferentes graus de complexidade. Associados ao desenvolvimento dos computadores, os modelos determinísticos de simulação de cheias mais complexos têm tido crescente utilização na caracterização da resposta hidrológica das bacias hidrográficas (ramo terrestre do ciclo hidrológico) a determinadas precipitações e a alterações, quer na rede hidrográfica quer na ocupação e uso do solo, bem como na determinação do amortecimento e na simulação da propagação dos hidrogramas de cheia. Entre estes modelos determinísticos estão, por exemplo, o *Standford Watershed Model IV* (1959 e 1966), *SHE – Système Hydrologique Européen* (1986) e o *MOHID – Water Modelling System* (Copyright by Maretec, IST, 2002, <http://www.mohid.com/>).

As cheias podem também ser simuladas mediante a aplicação dos modelos menos complexos, de utilização mais fácil, que não consideram algumas variáveis do processo hidrológico, ou recorrendo a modelos de acontecimento, neste caso em detrimento da utilização de modelos contínuos mais exigentes em termos de caracterização de variáveis. Entre estes modelos menos complexos incluem-se, por exemplo, os modelos baseados no método do hidrograma unitário, amplamente usados para descrever a relação precipitação útil - escoamento direto, que permitem determinar hidrogramas de cheia a partir da análise dos registos udográficos e hidrométricos de acontecimentos hidrometeorológicos. Entre estes modelos determinísticos estão o *HEC-1* ou o *HEC-HMS* do *United States Army Corps of Engineers (USACE)* e o *TR-20* do *United States Department of Agriculture (USDA) - Soil Conservation Service*.

Com o objetivo de contribuir especificamente para melhorar a previsão das cheias naturais na região de Lisboa, o presente estudo recorreu à modelação precipitação-escoamento através do método do hidrograma unitário, sob a forma de modelo de acontecimento, recorrendo ao *HEC-HMS, versão 3.5 (2010)*.

As cheias contam-se entre as catástrofes naturais que, ao longo dos tempos, maiores prejuízos materiais e perda de vidas humanas têm provocado em várias zonas do globo. Em Portugal, segundo a Base de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT)¹, as cheias correspondem às catástrofes naturais mais frequentes e estão em segundo lugar em termos do número de mortos, pessoas afetadas e valor de prejuízos registados (Quadro 1.1).

Quadro 1.1 – Catástrofes naturais EM-DAT (período de análise 1900-2015).

Tipo de catástrofes naturais (Portugal)	Nº de ocorrências	Nº de mortos	Nº de afetados	Total de prejuízos (1000 US\$)
Secas	3	0	0	1 443 136
Temperaturas extremas (baixas e altas)	4	2737	0	-
Cheias	13	596	53534	1 493 100
Precipitações extremas	9	49	4291	295 000
Incêndios florestais	9	69	150186	3 475 000
Ordenação das cheias	1º	2º	2º	2º

Com o objetivo de reduzir as consequências prejudiciais associadas às inundações provocadas pelas cheias, o Homem tem construído obras hidráulicas, bem como desenvolvido sistemas de previsão com o objetivo de alertar a população, sobretudo em zonas onde não é possível implementar soluções estruturais para proteção contra cheias ou onde tais soluções apenas asseguram proteção para eventos mais frequentes. Ambas as estratégias implicam uma caracterização temporal e espacial das chuvadas que podem conduzir à ocorrência de cheias, seguida da utilização de modelos de simulação dos processos hidrológicos e hidráulicos, normalmente à escala da bacia hidrográfica, permitindo estimar as características das cheias a que essas chuvadas podem dar origem.

Não é habitual realizar a simulação hidrológica e hidráulica com base num único modelo, já que tal modelo único exigiria um elevado número de parâmetros de difícil calibração e uma escala espacial demasiado detalhada do ponto de vista hidrológico, para atender às exigências da modelação hidráulica. Assim, é prática corrente utilizar, em primeiro lugar, modelos hidrológicos que simulam os processos correspondentes à conversão da precipitação em escoamento (interceção, infiltração, retenção superficial e escoamento ao longo das encostas, fundamentalmente) numa escala mais grosseira. Os valores de escoamento obtidos com tais modelos são os dados de entrada do modelo hidráulico que, com uma escala espacial detalhada, simula o escoamento e determinam níveis de inundação. Em conjunto, os modelos hidrológicos e hidráulicos fornecem os caudais, as cotas e a respetiva extensão territorial inundada, informações essenciais para estimar o risco associado a cheias com diferentes períodos de retorno (intervalo de tempo médio de ocorrência de um determinado evento, obtido pelo inverso da probabilidade de um evento ser igualado ou excedido).

¹ <http://www.emdat.be>

O risco é um conceito abrangente, com múltiplas dimensões, que está relacionado com outros conceitos relevantes entre os quais: incerteza e probabilidade; segurança e fiabilidade; severidade e perigosidade; exposição e vulnerabilidade (Almeida, 2011).

Almeida (2011) identifica diversas dimensões do risco com relevância para a sua aplicação ao estudo das cheias e seus efeitos:

- técnica (caracterização quantitativa e objetiva intrínseca da engenharia e gestão);
- subjetiva (percepção individual na resposta a situações de perigo ou ameaça em ambiente de incerteza);
- social (percepção social da sociedade no que se refere à participação pública e à interação com a comunicação social);
- jurídica (aplicação das leis, resolução de conflitos e definição de responsabilidades);
- económica e financeira (avaliação dos mercados e consequências económicas);
- política (avaliação do poder político e governança no planeamento de ações e na gestão dos recursos e medidas).

Na dimensão técnica associada à hidrologia é possível relacionar o período de retorno ao risco de cheias, sendo este definido como a probabilidade de a magnitude de um dado evento não ser ultrapassada num determinado número de anos sucessivos ou a probabilidade de que a magnitude do evento seja excedida pelo menos uma vez num determinado número de anos sucessivos.

Na dimensão técnica associada ao ordenamento e gestão do território, o conceito de risco de cheias poderá integrar a probabilidade de ocorrência e a severidade (capacidade de provocar danos), de que resulta a perigosidade do evento, sendo os danos provocados decorrentes dos elementos expostos ao evento. Nesta dimensão está o conceito do risco mencionado na Diretiva 2007/60/CE, de 23 de outubro, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações com transposição para o direito nacional através do Decreto-Lei nº 115/2010, de 22 de outubro. Esta norma legal estabelece um quadro nacional para a avaliação e gestão dos riscos de inundações, com o objetivo de reduzir as consequências prejudiciais associadas às inundações para a saúde humana (incluindo perdas humanas), o ambiente, o património cultural, as infraestruturas e as atividades económicas.

No presente estudo pretende-se contribuir para melhorar a avaliação do risco de cheias associado ao ordenamento e gestão do território na área metropolitana de Lisboa, através da determinação do caudal de cheia associado a um período de retorno, que deverá ser utilizado para avaliar as áreas inundadas e, consequentemente, melhor identificar as consequências nefastas para a população e sobre as infraestruturas atingidas (exposição) e os meios necessários para mitigar as vulnerabilidades do território, e para melhorar a resposta dos sistemas de aviso relativos às cheias. Entende-se por vulnerabilidade o grau de danos nos elementos identificados como expostos num sistema em análise em consequência da ocorrência do acontecimento com determinada severidade ou magnitude (Almeida, 2011).

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste estudo é calibrar um conjunto de modelos hidrológicos para simular a resposta de sete bacias hidrográficas localizadas na densamente povoada região metropolitana de Lisboa (Jamor, Barcarena, Loures, Laje, Trancão, Colares e Caparide), com dimensões entre cerca de 10 e 100 km². Os hidrogramas de cheia simulados permitirão produzir diversos níveis de aviso, contribuindo para diminuir a vulnerabilidade às cheias e, posteriormente, avaliar as zonas inundáveis. Esta modelação permitirá avaliar o risco associado a cheias com diferentes períodos de retorno e contribuirá para auxiliar a salvaguarda de pessoas, bens e ambiente. A sua possível incorporação no Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH) permitiria aumentar a respetiva eficácia e eficiência como medida de apoio à atividade da Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC).

A caracterização da precipitação efetuar-se-á com base em dois tipos de dados: os valores pontuais medidos nas estações udográficas do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) e do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. (IPMA, I.P.), e os valores distribuídos de forma contínua no espaço, estimados através das imagens do radar meteorológico de Cruz do Leão, em Coruche. As estimativas da intensidade de precipitação efetuadas a partir do radar, calibradas com base nos valores pontuais dos udógrafos, permitirão diminuir as imprecisões na caracterização espaço temporal da precipitação. Deste modo, será possível avaliar o volume precipitado numa dada área, ou seja em uma ou mais bacias hidrográficas, para diferentes intervalos de agregação temporal (múltipla da horária), e qual a origem sinóptica dos acontecimentos pluviosos. Esta avaliação permitirá, também, identificar o método de estimação da distribuição espacial da precipitação que melhor reproduza os valores fornecidos pelo radar meteorológico.

Para além de melhorar a estimativa da intensidade de precipitação, esta calibração contribuirá para obter uma mais rigorosa distribuição espacial da precipitação e para aumentar o tempo de aviso de cheia, o que é de particular importância em bacias hidrográficas pequenas, já que nestas um evento pluvioso muito localizado pode não ser captado pela rede udográfica. O aumento do tempo de aviso de cheia decorre da melhor estimativa da intensidade e distribuição da precipitação e da extrapolação do campo das intensidades de precipitação, com base na medição da velocidade e da direção de deslocamento da intensidade de precipitação, o que permite obter uma previsão da chegada do sistema pluvioso com uma antecipação de 3 h².

Serão utilizados modelos hidrológicos de acontecimento, o que permite desprezar alguns processos hidrológicos cuja calibração poderia ser excessivamente trabalhosa, e de resultados incertos, como a evapotranspiração (pouco importante durante as chuvadas extremas associadas à produção de cheias) e a resposta das águas subterrâneas (pouco importante num horizonte temporal da ordem das horas ou de poucos dias). Contudo, dentro deste tipo de modelos, há diversas alternativas para a simulação dos vários processos hidrológicos relevantes, umas relacionadas com a desagregação espacial a considerar, outras com a maior ou

² <http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>

menor base física das equações a utilizar. No presente estudo pretende-se identificar as alternativas que conduzam à melhor reprodução dos hidrogramas observados e, eventualmente, regionalizar os parâmetros de alguns dos modelos hidrológicos utilizados, relativos, por exemplo, ao modelo de infiltração e ao modelo de produção de escoamento superficial através do método do hidrograma unitário.

A identificação dos mais adequados modelos de infiltração, hidrogramas unitários e modelos de distribuição espaço temporal da precipitação permitirá simular hidrológicamente, com maior precisão, os eventos de cheia. Com esta informação são estimados os caudais, que poderão alimentar o modelo hidráulico com o qual se estimarão as cotas de cheia e as áreas inundadas associadas, que servirão de base para a avaliação dos potenciais prejuízos. Face à rapidez de previsão associada um sistema de modelação como o descrito, será possível efetuar alertas mais fidedignos.

1.3. Estrutura da dissertação

O estudo desenvolvido é apresentado ao longo de seis capítulos, cada um dos quais divididos em subcapítulos. A organização adotada tem por objetivos expor cientificamente os temas e os resultados que foram sendo obtidos, visando o desenvolvimento científico dos temas e abordando apenas o que é relevante para o entendimento e discussão dos resultados. Esta organização produz uma dissertação composta por módulos de leitura praticamente independente.

No presente capítulo enquadra-se o estudo desenvolvido, focando a sua importância e apresentando os objetivos estabelecidos, e expõe-se a sua organização. Efetua-se, também, a síntese de cada capítulo, permitindo assim obter uma visão integrada do estudo.

No capítulo 2 apresentam-se a zona geográfica onde este estudo foi aplicado (parte da área metropolitana de Lisboa), as bacias hidrográficas consideradas e os dados e informações hidrológicas necessários para o seu desenvolvimento. Os dados hidrológicos incluem séries históricas hidrométricas e meteorológicas recolhidas na rede de monitorização de recursos hídricos sob a responsabilidade da Autoridade Nacional da Água, disponibilizada no portal do SNIRH, e os dados cedidos pelo IPMA, I.P., nomeadamente, as precipitações horárias da sua rede de observação e as intensidades de precipitação horária obtidas pelo radar meteorológico de Cruz do Leão, localizado em Coruche. A informação hidrológica compreende ainda a localização e os períodos de funcionamento das estações de monitorização, bem como a avaliação da qualidade das curvas de vazão. Neste capítulo é realizada a análise de homogeneidade / consistência das séries históricas dos dados das estações de monitorização utilizadas, a caracterização espacial da precipitação e a análise da origem sinótica dos fenómenos estudados nos capítulos subsequentes.

No capítulo 3 apresentam-se os conceitos teóricos do funcionamento do radar meteorológico, bem como os problemas associados ao seu funcionamento e à sua utilização para previsão da intensidade de precipitação. De forma cronológica, é apresentada uma súmula de estudos relevantes sobre a utilização do radar meteorológico para estimar a intensidade de precipitação. Neste capítulo são também apresentados os resultados das calibrações das intensidades de precipitação do radar meteorológico de Cruz do Leão, obtidas

a partir das intensidades de precipitação registadas nas estações udográficas (calibração pontual) e das precipitações ponderadas nas áreas definidas pelas bacias hidrográficas associadas às estações hidrométricas (calibração espacial), como definidas no capítulo 2. O exercício da calibração pontual inclui o agrupamento dos valores de intensidade de precipitação consoante o fenómeno sinóptico responsável pela sua ocorrência (situação de ciclone e anticiclone, com ou sem superfície frontal, ou situação depressionária complexa), como caracterizado no capítulo 2. São identificadas relações entre a refletividade medida pelo radar, Z , e a intensidade da precipitação, R , adaptadas a várias situações e comparadas com as referidas na bibliografia especializada, por exemplo, a proposta de Marshall e Palmer (1948), geralmente utilizada nos radares meteorológicos em funcionamento como base para estimar a intensidade de precipitação. Pela primeira vez, são apresentadas relações $Z-R$ ajustadas a um radar meteorológico localizado em Portugal (Cruz do Leão), que poderão ser aplicadas aos outros dois radares meteorológicos portugueses (Arouca e Loulé), permitindo, assim, melhorar a estimativa das intensidades de precipitação a nível nacional.

No capítulo 4 apresentam-se os conceitos relativos aos principais processos intervenientes no ciclo hidrológico e à sua representação nos modelos hidrológicos, que são diversos consoante o objetivo pretendido e os dados disponíveis. É apresentado o suporte teórico do método do hidrograma unitário, amplamente utilizado para simulação de eventos de cheia e, nomeadamente, em estudos associados ao dimensionamento de infraestruturas hidráulicas e à previsão de cheias. Neste capítulo são caracterizados alguns hidrogramas unitários sintéticos (baseados nas características fisiográficas) e estimados os hidrogramas unitários com base nos dados observados. Obtém-se um conjunto de hidrogramas unitários associados às bacias e à zona em estudo, que permitirão, no capítulo 5, realizar a simulação de cheias históricas, e selecionar aqueles que melhor descrevem as ocorrências de cheia. Uma vez que o método do hidrograma unitário estabelece uma relação entre a precipitação útil (fração da precipitação que dá origem ao escoamento direto) e o escoamento direto, para calibração deste método efetuou-se também a escolha do método para obtenção da precipitação útil, de entre os métodos de perdas do *Soil Conservation Service* (SCS) e do índice Φ .

No capítulo 5 efetuam-se as simulações hidrológicas relativa aos 68 acontecimentos hidrometeorológicos identificados (capítulo 2), através do programa HEC-HMS, versão 3.5 (2010). As simulações realizadas recorrem à caracterização da precipitação efetuada nos capítulos 2 e 3, à obtenção dos hietogramas de precipitação útil através do método do SCS (capítulo 4), e aos hidrogramas unitários apresentados e desenvolvidos (capítulo 4). Efetuam-se análises de ajustamento entre os hidrogramas de escoamento simulados e observados, recorrendo a estatísticas de avaliação, umas privilegiando a totalidade do hidrograma outras focando o caudal de ponta e respetivo tempo para a ponta. Neste capítulo é sumariamente descrito o atual Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH), com ênfase para a zona metropolitana de Lisboa, e são propostas melhorias no procedimento de previsão das cheias, sendo estas avaliadas em termos de redução do risco às cheias, através da diminuição da vulnerabilidade da população. No final, efetua-se uma análise crítica dos resultados obtidos, que conduz à identificação do hidrograma unitário mais adequado.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões do estudo e as perspetivas para futuras investigações no domínio da utilização das imagens do radar meteorológico na modelação hidrológica.

2. CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS E DOS ACONTECIMENTOS A ANALISAR

2.1. Características fisiográfica das bacias hidrográficas

O território a estudar localiza-se na densamente povoada área metropolitana de Lisboa (zona a norte do rio Tejo) e está associado a doze cursos de água: Algés, Barcarena, Caparide, Carenque, Colares, Foz do Guincho, Jamor, Laje, Loures, Póvoa, Trancão e Vinhas. Estes cursos de água desenvolvem-se em bacias hidrográficas cujo comportamento hidrológico é determinado por características climáticas e fisiográficas. As características fisiográficas incluem características como a área, o declive, a forma e estrutura da rede de drenagem fluvial, a geologia, o tipo e uso dos solos (descrito pela cobertura vegetal e pela ocupação humana).

Considerando a localização geográfica das 15 estações hidrométricas situadas nos cursos de água acima mencionados e o Modelo de Elevação do Terreno (MET) desenvolvido pelo SNIRH, delimitaram-se as 15 bacias hidrográficas correspondentes, como representado na Fig. 2.1, e determinaram-se algumas características fisiográficas através da aplicação da metodologia de Jenson e Domingue (1988), recorrendo a ferramentas SIG (Quadro 2.1).

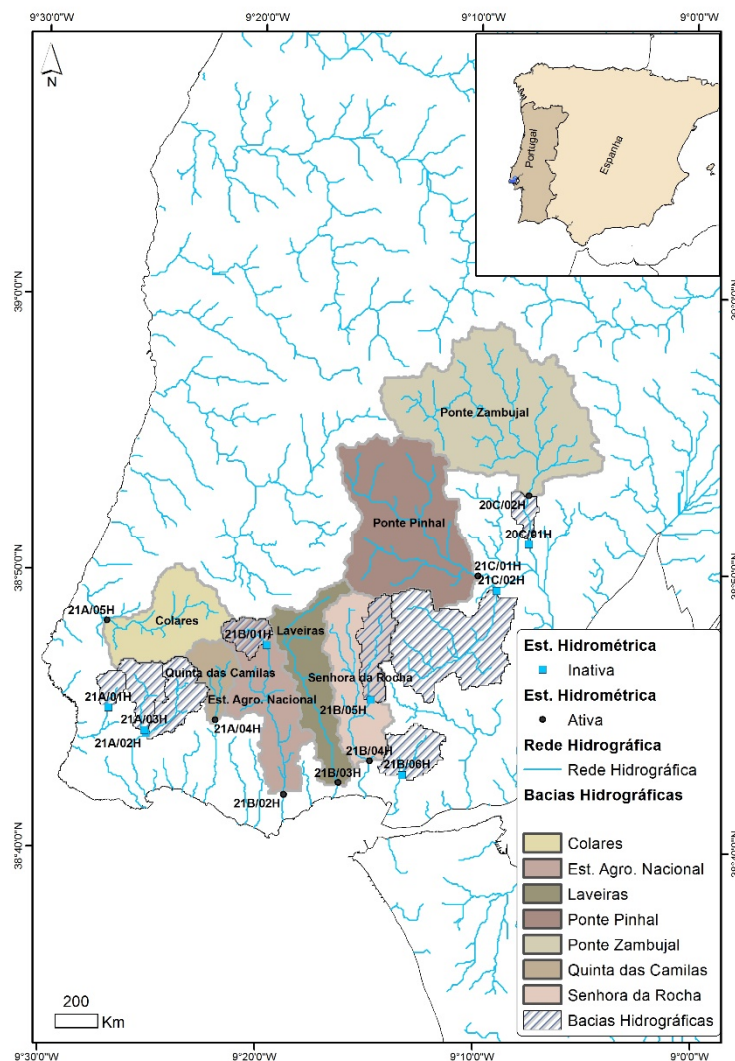


Figura 2.1 - Localização das estações hidrométricas ativas e inativas e delimitação das respectivas bacias hidrográficas.

Quadro 2.1 - Características fisiográficas das 15 bacias hidrográficas: área da bacia hidrográfica (A), altitude mínima da bacia hidrográfica (Z_{\min}), altitude média da bacia hidrográfica (Z_m), declive médio da bacia hidrográfica (Y), comprimento do curso de água principal (L_{ca}), comprimento do curso de água principal prolongado até à linha de cumeada (L), declive médio do curso de água principal (J) e Número de Escoamento (N).

Estação hidrométrica SNIRH	Curso de água	Código SNIRH	A (km ²)	Z_{\min} (m)	Z_m (m)	Y (%)	L_{ca} (km)	L (km)	J (-)	N para AMC_{II} (-)
Ponte Pisão	Ribeira das Vinhas	21A/03H	9,3	69	237	16,6	6,528	7,728	0,0499	74,66
Quinta do Pisão	Ribeira das Vinhas	21A/02H	21,5	69	209	13,1	7,220	8,320	0,0466	77,08
Quinta das Camilas	Ribeira de Caparide	21A/04H	10,4	117	205	8,0	7,022	7,300	0,0366	81,99
Estação Agronómica Nacional	Ribeira da Laje	21B/02H	37,5	9	136	7,1	15,629	17,429	0,0128	85,12
Mercês	Ribeira da Laje	21B/01H	6,2	145	186	5,2	4,597	6,097	0,0138	85,86
Laveiras	Ribeira da Barcarena	21B/03H	33,2	9	165	9,3	18,083	20,793	0,0157	78,62
Senhora da Rocha	Rio Jamor	21B/04H	41,4	24	185	10,0	14,236	16,736	0,0198	78,28
Ponte Lido (Amadora)	Ribeira de Carenque	21B/05H	12,3	110	212	10,7	8,401	9,801	0,0220	77,85
Ponte Miraflares	Ribeira de Algés	21B/06H	10,3	16	109	8,5	5,215	5,715	0,0339	86,53
Ponte Zambujal	Rio Trancão	20C/02H	99,1	73	215	12,6	20,395	20,795	0,0083	80,93
Ponte Canas	Rio Trancão	20C/01H	103,7	4	210	12,6	24,605	26,405	0,0099	81,01
Ponte Resinga	Ribeira da Póvoa	21C/02H	42,8	2	124	10,4	14,312	15,412	0,0193	85,29
Ponte Pinhal	Ribeira de Loures	21C/01H	77,6	5	212	14,2	17,512	19,004	0,0206	77,23
Ponte Malveira da Serra	Ribeira da Foz do Guincho	21A/01H	3,5	130	301	19,8	3,325	4,425	0,0976	63,48
Colares	Ribeira de Colares	21A/05H	32,3	17	191	13,5	11,536	12,636	0,0221	70,24

O MET resultou do processamento dos dados altimétricos do “*Shuttle Radar Topography Mission*” (SRTM) para a Península Ibérica, disponível em <http://srtm.usgs.gov/>, com uma resolução base de 90 m. De forma a poder incluir a rede de drenagem no processo de interpolação abaixo referido, foi necessário gerar uma rede hidrográfica sem linhas duplas e corrigir os sentidos de drenagem.

Na elaboração do MET utilizou-se o método de interpolação baseado no algoritmo ANUDEM (Hutchinson, 1988 e 1989), recorrendo ao comando “*Topo to Raster*” da extensão “*Spatial Analyst*” do programa informático ArcGIS da ESRI. Este método de interpolação conduz a um MET que permite reproduzir uma topografia com definição adequada para a delimitação e caracterização das bacias hidrográficas. O método utiliza um processo iterativo de diferenças finitas e foi desenvolvido de forma a ter a eficiência computacional dos métodos de interpolação locais como o “inverso do quadrado da distância (IDW)”, sem gerar descontinuidades na superfície, sendo um método de interpolação especialmente adequado para aplicações hidrológicas.

MET (Modelo de Elevação do Terreno) ou DEM (Digital Elevation Model) corresponde à representação numérica digital computadorizada das formas topográficas, expressas pelas variações de altitudes, que uma determinada superfície apresenta. Estas formas são definidas por um número elevado de pontos sobre um plano cartográfico associados a um conjunto de coordenadas X , Y e Z , sendo que as coordenadas Z são as altitudes ou as profundidades num modelo tridimensional. Este é construído a partir das curvas de nível e de pontos altimétricos. O MDT (Modelo Digital do Terreno) ou DTM (Digital Terrain Model) incorpora no MET outros

elementos geográficos e recursos naturais como rios, linhas de cumeada, albufeiras e outras informações obtidas por conhecimento local, que permite corrigir a representação numérica obtida pelos dados originais.

Algumas das características físicas apresentadas neste capítulo são descritas pelo Número de Escoamento (N), que resulta da combinação entre tipo hidrológico do solo (classificação do *Soil Conservation Service*), da sua utilização ou cobertura e das condições médias do seu humedecimento (AMC_{II}^3), que corresponde ao teor de humidade do solo aproximadamente à capacidade de campo. Este número varia entre 0 e 100, a que correspondem, respetivamente, a bacias que não produzem escoamento e as bacias cujo escoamento é o máximo (impermeáveis à precipitação).

O SCS (1972) propôs quatro categorias do tipo hidrológico do solo: A - baixo potencial de escoamento superficial; B - potencial de escoamento superficial abaixo da média; C - potencial de escoamento superficial acima da média e D - elevado potencial de escoamento superficial. O tipo hidrológico do solo determinado para este estudo teve como base os tipos geológicos de solo do Atlas do Ambiente, produzido pela Direcção-Geral do Ambiente à escala 1:1 000 000, com a imagem à escala 1:3 000 000 proposta por David (1976) (carta baseada na carta de solos de Portugal elaborada por Cardoso, Bessa e Marado, 1973). A ocupação e uso do solo são classificados segundo o CORINE *Land Cover* (2006), o qual está disponível no portal <http://www.igeo.pt/produtos/CEGIG/Corine.htm>, em 63 códigos. A partir destes códigos e do tipo hidrológico do solo, e segundo a proposta de Lobo-Ferreira (1995), obtiveram-se os números de escoamento (AMC_{II}) para Portugal Continental (<http://snirh.pt> e Neves, *et al.*, 2015).

2.2. Dados hidrometeorológicos

A dispersão geográfica das áreas a monitorizar e a necessidade de atuar perante situações críticas, por exemplo, cheias e acidentes de poluição, implicam a existência de uma rede de monitorização integrando estações de medição localizadas em zonas estratégicas. No caso das cheias, a aquisição dos dados na rede de monitorização deverá permitir efetuar a sua caracterização hidrológica e identificar as situações sinópticas responsáveis pela sua ocorrência, numa dada bacia hidrográfica, assim como relacioná-las com as características fisiográficas das bacias que condicionam a sua propagação. Com esta informação, recolhida em locais dispersos mas representativos (estratégicos), é possível caracterizar espacialmente o fenómeno meteorológico e a respetiva formação do escoamento na bacia hidrográfica (fenómeno hidrológico).

Os dados registados nas estações meteorológicas e hidrométricas da rede de monitorização de recursos hídricos da Autoridade Nacional da Água são, desde 2001, obtidos através de sensores e armazenados na base de dados do SNIRH, estando disponíveis ao público a partir do portal <http://snirh.pt>. O processo de substituição de equipamentos mecânicos por sensores foi designado por automatização da rede nacional de monitorização de recursos hídricos, onde, por exemplo, os limnígrafos foram substituídos por sensores de nível, enquanto os

³ *Antecedent Moisture Condition* (condições antecedentes de humidade).

udómetros e udógrafos (de báscula ou de sifão) foram substituídos por udógrafos de báscula que contabilizam o número de basculações, correspondendo cada uma a uma altura acumulada de 0,1 mm.

Na área metropolitana de Lisboa, que abrange dezoito concelhos, e o concelho de Arruda dos Vinhos identificaram-se 19 estações meteorológicas exploradas pela APA, I.P., das quais três não foram automatizadas e uma foi desativada a 20/05/2009 (Quadro 2.2), 17 estações meteorológicas exploradas pelo IPMA, I.P. (Quadro 2.3), e 15 estações hidrométricas exploradas pela APA, I.P., sendo que oito foram extintas anteriormente a 2000 (Quadro 2.4).

A automatização das estações geridas pela APA, I.P., permitiu que registem de forma contínua as suas variáveis, com intervalos temporais pelo menos horários. Os códigos destas estações incorporam no seu final uma ou duas letras que permitem identificar o tipo de estação: hidrométricas (“H”), climatológicas (“C” e “GC”) e udográficas (“UG”). Nos quadros acima mencionados a localização das estações está expressa no sistema de coordenadas retangulares, isto é, em *M* e *P* (designadas, também, por *X* e *Y*) e expressas em metros.

As estações climatológicas geridas atualmente pela APA, I.P., registam horariamente os dados das seguintes variáveis: temperatura, humidade do ar, precipitação, radiação solar, velocidade e direção do vento e nível da tina evaporimétrica. Nestas variáveis climáticas, com exceção da precipitação, os parâmetros associados aos menores intervalos de tempos (horário) resultam da média de valores monitorizados e armazenados temporariamente no *datalogger* em menores intervalos de tempo. Nas estações udográficas, como nas climatológicas, registam-se horariamente a precipitação, velocidade e direção do vento, sendo que o registo da precipitação e da velocidade do vento passa a ser por minuto desde que se registe precipitação não nula. A precipitação no instante horário *t* corresponde ao valor acumulado entre os instantes *t* – 1 h (mais um minuto) e o instante *t*.

Nas estações geridas pelo IPMA, I.P., os seus códigos terminam com as letras IM, acrónimo de Instituto de Meteorologia, organismo público que precedeu o IPMA, I.P..

Nas estações hidrométricas são registados níveis hidrométricos horários e quando a mesma entra em alerta (porque atinge um determinado valor crítico) poderá registar dados em intervalos temporais menores (e.g., 15 minutos). O nível hidrométrico no instante horário *t* corresponde ao valor médio durante a hora de registo (obtida a partir de quatro valores, memorizados em cada 15 minutos).

As localizações das diversas estações de monitorização estão representadas no mapa da Fig. 2.2, sendo que todas estas estações se localizam no distrito de Lisboa.

No **Anexo 1** são apresentadas as fotografias das estações meteorológicas e hidrométricas sob a responsabilidade da Autoridade Nacional da Água.

Quadro 2.2 - Identificação e caracterização das estações meteorológicas da Autoridade Nacional da Água.

Estação meteorológicas SNIRH	Código SNIRH	Estado de automatização	M (m)	P (m)	Início e fim de funcionamento (convencional)	Início de funcionamento (automática)	Concelho / Freguesia	Bacia hidrográfica
Cheleiros	20B/04GC	Ativa (sem telemetria)	95795	214342	01/10/1980; 11/08/2004	11/08/2004	Mafra / U.F. de Igreja Nova e Cheleiro	Ribeiras do Oeste
Colares (Sarrazola)	21A/01C	Não instalada - a automatizar	84974	204669	01/10/1965; 01/01/2002	-	Sintra / Colares	Ribeiras do Oeste
Malveira da Serra	21A/12G	Ativa (com telemetria)	86659	200162	-	09/10/2004	Cascais / Alcabideche	Ribeiras do Oeste
Barragem rio da Mula	21A/10G	Ativa (sem telemetria)	87938	200260	01/10/1989; 12/08/2004	12/08/2004	Cascais / Alcabideche	Ribeiras do Oeste
Quinta do Pisão	21A/08UG	Não instalada - a automatizar	87787	197041	01/10/1980; 01/01/2002	-	Cascais / Alcabideche	Ribeiras do Oeste
Cascais	21A/11G	Ativa (sem telemetria)	87327	193650	01/03/1991; 14/11/2001	14/11/2001	Cascais / Cascais e Estoril	Ribeiras do Oeste
Cacém	21B/10G	Ativa (sem telemetria)	98416	201764	01/10/1979; 16/01/2002	16/01/2002	Sintra / U.F. de Cacém e São Marcos	Tejo
Sacavém de Cima	21C/01UG	Não instalada - a automatizar	114863	203398	01/10/1931; 01/01/2002	-	Loures / U.F. de Sacavém e Prior Velho	Tejo
Caneças	21B/11UG	Ativa (com telemetria)	105321	206775	01/10/1980; 03/11/2004	03/11/2004	Odivelas / U.F. de Ramada e Caneças	Tejo
Lisboa (INAG)	21C/02G	Desativada	113140	198202	-	13/01/2005	Lisboa /Marvila	Tejo
São Julião do Tojal	20C/01C	Ativa (com telemetria)	114090	208796	01/10/1937; 05/05/1998	05/05/1998	Loures / U.F. de Santo Antão do Tojal e São Julião do Tojal	Tejo
Lousa	20B/03C	Ativa (sem telemetria)	106852	213882	01/10/1979; 13/10/2005	13/10/2005	Loures / Lousa	Tejo
Sobral da Abelheira	20B/02UG	Ativa (com telemetria)	96364	226305	01/10/1979; 18/10/1997	18/10/1997	Mafra / U.F. de Azueira e Sobral da Abelheira	Ribeiras do Oeste
Milharado	20B/06UG	Ativa (sem telemetria)	107301	220778	01/10/1980; 09/11/2001	09/11/2001	Mafra / Milharado	Tejo
Arranhó	20C/03G	Ativa (com telemetria)	112953	220951	01/10/1979; 11/08/2004	11/08/2004	Arruda dos Vinhos / Arranhó	Tejo
Calhandriz	20C/04UG	Ativa (sem telemetria)	119174	218371	01/10/1980; 09/11/2001	09/11/2001	Vila-Franca-de-Xira / U.F. de Alhandra, São João dos Montes e Calhandriz	Tejo
Linhó	21A/09G	Ativa (sem telemetria)	91540	200769	01/10/1989; 12/08/2004	12/08/2004	Sintra / U.F. de Sintra	Ribeiras do Oeste
Monte da Caparica	22B/01C	Ativa (com telemetria)	106897	188713	01/05/1985; 18/07/1994	01/04/2001	Almada / U.F. de Caparica e Trafaria	Tejo
Vila Nogueira de Azeitão	22C/02UG	Ativa (com telemetria)	123280	172472	27/10/1931; 13/12/2000	13/12/2000	Setúbal / Azeitão	Tejo

Legenda: U.F. – União das Freguesias.

Quadro 2.3 – Identificação e caracterização das estações meteorológicas do IPMA, I.P..

Designação das estações meteorológicas (IPMA, I.P.)	Código (SNIRH)	M (m)	P (m)	Início de funcionamento	Tipo de estação	Concelho / Freguesia	Bacia hidrográfica
Lisboa (Tapada da Ajuda)	21B/07IM	108697	194117	01-01-1921	Convencional	Lisboa / Alcântara	Tejo
Lisboa (Instituto Geofísico Infante D. Luís)	21C/06IM	111584	195113	01-01-1836	Convencional	Lisboa / São Mamede, São José e Coração de Jesus	Tejo
Lisboa (Gago Coutinho)	21C/09IM	113504	200370	01-01-1982	Convencional	Lisboa / Olivais	Tejo
Cabo Raso (Farol)	21A/08IM	82371	194375	04-11-1996	Automática	Cascais / Cascais e Estoril	Ribeiras do Oeste
Sintra (Granja)	21B/01IM	95658	207850	01-10-1882	Convencional	Sintra / U.F. de Almargem do Bispo, Pêro Pinheiro e Montelavar	Ribeiras do Oeste
Montijo (Base aérea)	21C/07IM	120115	192765	01-10-1954	Convencional	Montijo / U.F. de Montijo Afonsoeiro	Tejo
Barreiro (Lavrado - Quimigal)	21C/01IM	120421	190061	01-01-1967	Convencional	Barreiro / U.F. do Alto do Seixalinho, Santo André e Verderena	Tejo
Amadora	21B/09IM	103572	199480	01-01-2002	Automática	Amadora / Venteira	Tejo
Lisboa (Benfica)	21B/16IM	107296	198467	01-01-2002	Automática	Lisboa / Benfica	Tejo
Cacém	21B/18IM	98630	200878	01-01-2002	Automática	Sintra / U.F. de Aqualva e Mira Sintra	Tejo
Lisboa (Alvalade)	21C/11IM	112073	199223	01-01-2002	Automática	Lisboa / Campo Grande, São João de Brito e Alvalade	Tejo
Lisboa (Baixa)	21C/12IM	112937	194193	01-01-2002	Automática	Lisboa / Mártires, Sacramento, São Nicolau, Madalena, etc.	Tejo
Lisboa (Estefânia)	21C/13IM	112153	196266	01-01-2002	Automática	Lisboa / Anjos, Pena e São Jorge de Arroios	Tejo
Sintra (Pena)	21A/14IM	91364	202498	03-04-2009	Automática	Sintra / U.F. de Sintra	Ribeiras do Oeste
Loures	21B/12IM	110021	207274	01-01-2005	Automática	Loures / Loures	Tejo
Almada (Praia da Rainha)	22B/01IM	105959	183841	26-11-2001	Automática	Almada / U.F. de Caparica e Trafaria	Tejo
Barreiro	22C/01IM	118688	187850	01-01-2002	Automática	Barreiro /Lavrado	Tejo

Legenda: U.F. – União das Freguesias.

Quadro 2.4 - Identificação e caracterização das estações hidrométricas da Autoridade Nacional da Água.

Estação hidrométrica SNIRH	Código SNIRH	Estado de automatização	M (m)	P (m)	Início e fim de funcionamento (convencional)	Início e fim de funcionamento (automática)	Concelho / Freguesia	Bacia hidrográfica
Ponte Pisão	21A/03H	Não automatizar (extinta)	87945	197409	01/10/1984; 30/09/1990	-	Cascais / Alcabideche	Tejo
Quinta do Pisão	21A/02H	Não automatizar (extinta)	87910	197280	01/10/1984; 30/09/1990	-	Cascais / Alcabideche	Tejo
Quinta das Camilas	21A/04H	Ativa (sem telemetria)	92745	198753	01/10/1984; 15/11/2001	15/11/2001	Sintra / U.F. de Sintra	Tejo
Estação Agronómica Nacional	21B/02H	Ativa (com telemetria)	97384	193282	01/10/1985; 14/11/2001	14/11/2001	Oeiras / U.F. de Oeiras e São Julião da Barra, Paço de Arcos e Caxias	Tejo
Mercês	21B/01H	Não automatizar (extinta)	96079	203021	01/10/1985; 30/09/1989	-	Sintra / Rio Mouro	Tejo
Laveiras	21B/03H	Ativa (com telemetria)	100827	193979	01/01/1987; 14/11/2001	14/11/2001	Oeiras / U.F. de Oeiras e São Julião da Barra, Paço de Arcos e Caxias	Tejo
Senhora da Rocha	21B/04H	Ativa (com telemetria)	102904	195395	01/10/1988; 14/11/2001	14/11/2001	Oeiras / U.F. de Carnaxide e Queijas	Tejo
Ponte Lido (Amadora)	21B/05H	Não automatizar (extinta)	103027	199432	01/10/1988; 30/09/1990	-	Sintra / U.F. de Queluz e Belas	Tejo
Ponte Miraflores	21B/06H	Não automatizar (extinta)	105064	194397	01/10/1988; 01/01/2000	-	Oeiras / U.F. de Algés, Linda-a-Velha e Cruz Quebrada/Dafundo	Tejo
Ponte Zambujal	20C/02H	Desativada	113628	213405	-	13/10/1997; 27/05/2005	Loures / Bucelas	Tejo
Ponte Canas	20C/01H	Não automatizar (extinta)	113865	209761	01/10/1959; 30/09/1991	-	Loures / U.F. de santo Antão do Tojal e São Julião do Tojal	Tejo
Ponte Resinga	21C/02H	Não automatizar (extinta)	112271	207317	22/09/1977; 30/09/1990	-	Loures / U.F. de Santo António dos Cavaleiros e Frielas	Tejo
Ponte Pinhal	21C/01H	Ativa (com telemetria)	110794	207864	01/10/1977; 13/11/2001	13/11/2001	Loures / Loures	Tejo
Ponte Malveira da Serra	21A/01H	Não automatizar (extinta)	85542	198912	01/10/1983; 01/01/2000	-	Cascais / Alcabideche	Tejo
Colares	21A/05H	Ativa (sem telemetria)	85877	204666	01/10/1986; 14/11/2001	14/11/2001	Sintra / Colares	Ribeiras do Oeste

Legenda: U.F. – União das Freguesias.

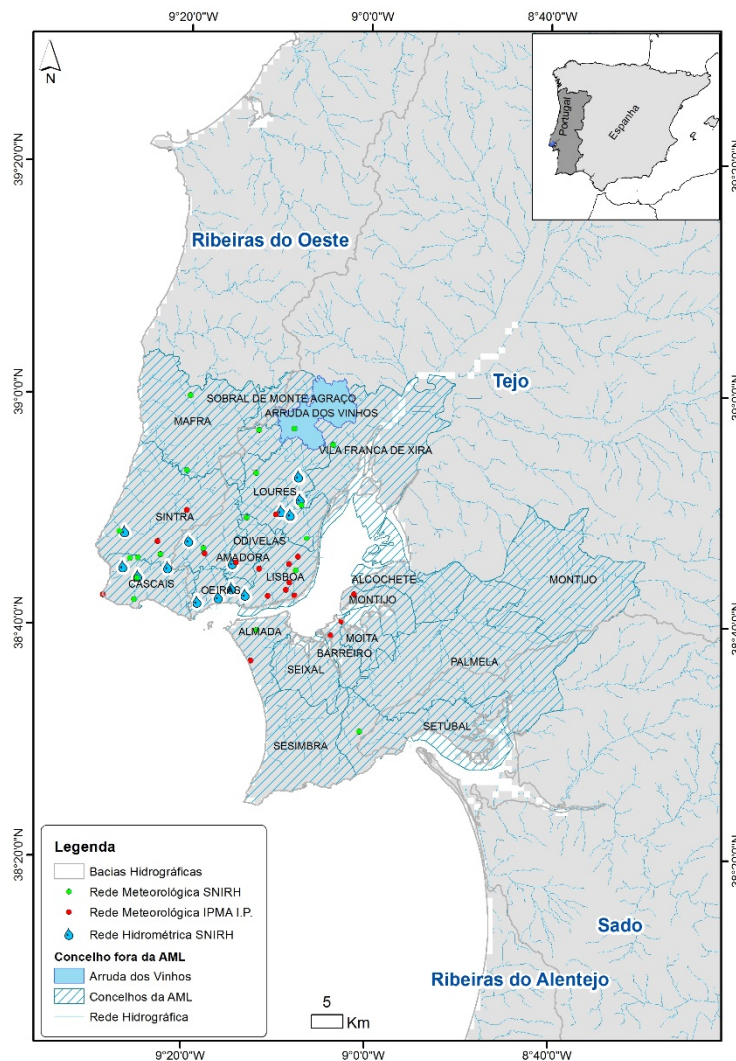


Figura 2.2 – Localização do total das estações de monitorização da Autoridade Nacional da Água (SNIRH) e do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA, I.P.).

2.3. Seleção dos acontecimentos hidrológicos

Os períodos de precipitação utilizados na calibração das imagens do radar meteorológico e nos modelos hidrológicos foram selecionados no intervalo de tempo compreendido entre 31 de Dezembro de 1999, data a partir da qual está a funcionar o radar meteorológico em Cruz do Leão e com os ficheiros das imagens de radar em formato IRIS (formato atual), e Agosto de 2008 (fim da manutenção regular das estações de monitorização da Autoridade Nacional da Água). Este período assegura que a maioria das estações de monitorização da Agência Portuguesa do Ambiente estão equipadas com sensores e *datalogger* (registadores de dados) que permitem o registo contínuo da precipitação e dos níveis hidrométricos, possibilitando efetuar avaliações com intervalos de tempo inferiores ao dia (desde o minuto à hora), durações compatíveis com os objetivos do presente estudo.

Considerando o período de análise, selecionaram-se 16 estações meteorológicas da Autoridade Nacional da Água, tendo sido excluídas as estações meteorológicas não automatizadas apresentadas no Quadro 2.2, e sete

estações hidrométricas, tendo sido excluídas as estações hidrométricas extintas apresentadas no Quadro 2.4. Entre as estações selecionadas está a estação meteorológica de Lisboa (INAG) e a estação hidrométrica de Ponte Zambujal, que foram desativadas, isto é, que foram eliminadas da rede de monitorização após alguns anos a funcionar como estações automáticas.

Considerando os registos das 16 estações meteorológicas da Autoridade Nacional da Água, livremente disponíveis, localizadas na área de estudo e ativas no intervalo temporal referido anteriormente, procedeu-se à seleção dos acontecimentos hidrológicos a analisar através das seguintes etapas:

- 1- A partir das séries da precipitação diária máxima anual de cada uma das 16 estações, identificaram-se os dias em que a precipitação é superior a duas polegadas (50,8 mm), sendo este o mesmo valor que o utilizado por Pereira (1995) para estudar as situações sinóticas responsáveis por precipitações intensas. Este limiar assegurará a formação de escoamento, com eventuais pontas de cheias relevantes, nas secções das bacias hidrográficas em análise. Verificou-se que este limiar é também igual à média das médias das séries históricas da precipitação diária máxima anual observadas nas estações selecionadas, não considerando, contudo, a estação de Lisboa (INAG), uma vez que esta não tem registos que permitam obter uma série histórica do parâmetro considerado (Fig. 2.3).

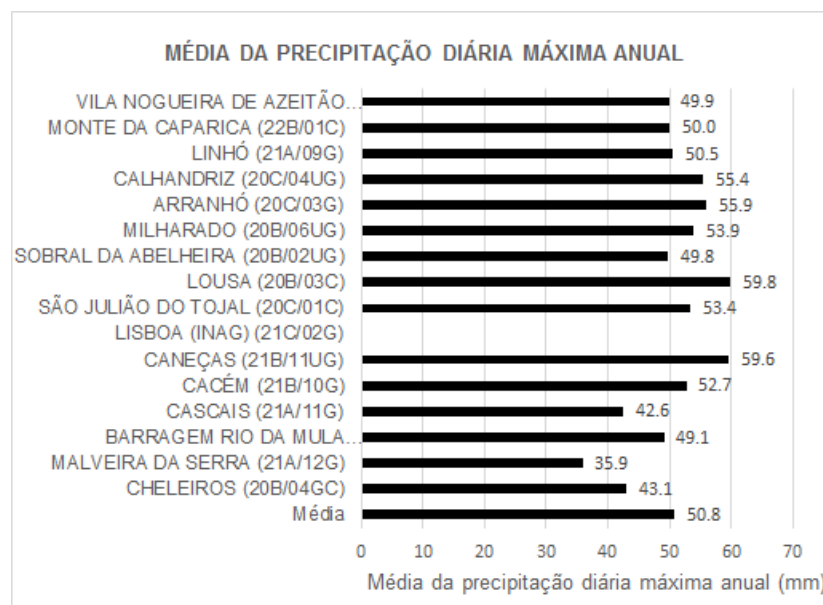


Figura 2.3 – Média da precipitação diária máxima anual das estações meteorológicas selecionadas.

- 2- Para cada período diário identificado numa determinada estação, selecionaram-se os mesmos períodos temporais dos registos das restantes estações.
- 3- Visando selecionar outras eventuais ocorrências pluviosas relevantes para a análise, alargaram-se os períodos temporais de precipitação, já identificados, para todo o mês.

A implementação deste procedimento permitiu selecionar os cinco períodos temporais de precipitação para os quais se efetuou uma avaliação mais pormenorizada dos dados hidrometeorológicos disponíveis, de forma a identificar as falhas existentes ao longo do registo de cada estação (Quadro 2.5), que poderão condicionar a utilização de um período específico de uma determinada estação de monitorização.

Quadro 2.5 - Avaliação das falhas de registo das 16 estações de monitorização nos cinco períodos temporais de precipitação.

Estação meteorológicas SNIRH	Código SNIRH	Precipitação diária (01/02/2008 a 29/02/2008)	Precipitação diária (01/10/2006 a 30/11/2006)	Precipitação diária (01/11/2005 a 30/11/2005)	Precipitação diária (15/09/2003 a 31/10/2003)	Precipitação diária (01/11/2000 a 31/01/2001)
Cheleiros	20B/04GC	22 - Falha (<i>datalogger</i> desparametrizado)	Completo		Falhas (Registo ausente da APA)	Completo
Malveira da Serra	21A/12G	Completo			Sem dados	Sem dados
Barragem rio da Mula	21A/10G	Completo			Sem dados (possivelmente na CCDR)	Completo
Cascais	21A/11G	1 a 2; 8 a 10; 12 a 29 - Falhas (bateria descarregada)	Completo			Sem dados (possivelmente na CCDR)
Cacém	21B/10G	Completo				
Caneças	21B/11UG	Completo			Sem dados (possivelmente na CCDR)	Completo
Lisboa (INAG)	21C/02G	18 a 19 - Falhas (avaria do equipamento)	1 a 8 de Out; 10.Out. a 20.Nov. - Falhas (avaria no equipamento e dados duvidosos)	1 - Falha (<i>datalogger</i> desparameterizado)	Sem dados	Sem dados
São Julião do Tojal	20C/01C	Completo				
Lousa	20B/03C	Completo		1 a 30 - Falhas (dados irre recuperáveis)	Sem dados (possivelmente na CCDR)	Sem dados (possivelmente na CCDR)
Sobral da Abelheira	20B/02UG	Completo	24 a 29 Nov. - Falhas (<i>datalogger</i> desparametrizado)	Completo		
Milharado	20B/06UG	Completo	1 a 22 Out. - Falhas (bateria descarregada)	Completo		
Arranhó	20C/03G	1 a 22 - Falhas (dados irre recuperáveis)	Completo			
Calhandriz	20C/04UG	Completo				
Linhó	21A/09G	Completo				
Monte da Caparica	22B/01C	Completo				Falhas (suspensa)
Vila Nogueira de Azeitão	22C/02UG	Completo				

Verificação análoga sobre a ocorrência de falhas de dados, nos períodos previamente seleccionados a partir da avaliação das estações da APA, foi efetuada nas 17 estações meteorológicas geridas pelo IPMA, I.P. (Quadro 2.6).

Quadro 2.6 - Avaliação das falhas de registo das 17 estações de monitorização (IPMA, I.P.) nos cinco períodos temporais de precipitação.

Designação das estações meteorológicas (IPMA)	Código (SNIRH)	Precipitação diária (01/02/2008 a 29/02/2008)	Precipitação diária (01/10/2006 a 30/11/2006)	Precipitação diária (01/11/2005 a 30/11/2005)	Precipitação diária (15/09/2003 a 31/10/2003)	Precipitação diária (01/11/2000 a 31/01/2001)
Lisboa (Tapada da Ajuda)	21B/07IM	Sem dados				
Lisboa (Instituto Geofísico Infante D. Luís)	21C/06IM	Completo				
Lisboa (Gago Coutinho)	21C/09IM	Completo				
Cabo Raso (Farol)	21A/08IM	Completo				
Sintra (Granja)	21B/01IM	Sem registo horário, apenas 6/6 horas				
Montijo (Base aérea)	21C/07IM	Sem registo horário, apenas 6/6 horas				
Barreiro (Lavrado - Quimigal)	21C/01IM	Completo				
Amadora	21B/09IM	Completo				Sem dados
Lisboa (Benfica)	21B/16IM	Completo				Sem dados
Cacém	21B/18IM	Completo				Sem dados
Lisboa (Alvalade)	21C/11IM	Completo				Sem dados
Lisboa (Baixa)	21C/12IM	Completo				Sem dados
Lisboa (Estefânia)	21C/13IM	Completo				Sem dados
Sintra (Pena)	21A/14IM	Sem dados				
Loures	21B/12IM	Completo			Sem dados	
Almada (Praia da Rainha)	22B/01IM	Completo				Sem dados
Barreiro	22C/01IM	Completo				Sem dados

4. Considerando a proposta de Huff (1967), onde a caracterização da distribuição temporal de precipitação das chuvadas intensas exige a seleção das chuvadas cuja rede de medição (rede em Illinois (EUA) composta por 49 estações e abrangendo uma área de 400 mi², 1036 km²), registasse uma precipitação média na rede superior a 12,7 mm (meia polegada) ou em que uma ou mais estações de medição registassem mais de 25,4 mm (uma polegada). No presente estudo, para além de adotar os limiares citados anteriormente propostos por Huff (1967), definiu-se um limiar para identificar classes dos eventos chuvosos intensos ocorridos nas estações de monitorização, nos períodos temporais já avaliados, que consiste na média aritmética das precipitações diárias em cada dia, registadas nas estações da rede de monitorização do Quadro 2.2, iguais ou superiores a 25,4 mm. Aos eventos assim selecionados adicionou-se o dia anterior e posterior. Este procedimento conduziu à seleção de 41 eventos chuvosos, dezasseis dos quais com precipitações superiores a 25,4 mm (Quadro 2.7).

Quadro 2.7 - Eventos chuvosos selecionados para comparação e calibração com a informação do radar em Cruz do Leão.

Períodos temporais	Nº de eventos chuvosos com média de precipitação diária igual ou superior a 25,4 mm	Nº de eventos chuvosos com média de precipitação diária superior a 12,7 e inferior a 25,4 mm	Nº total de eventos chuvosos
1/11/2000 a 31/01/2001	6	15	21
15/09/2003 a 31/10/2003	2	3	5
1/11/2005 a 30/11/2005	2	2	4
1/10/2006 a 30/11/2006	5	5	10
1/02/2008 a 28/02/2008	1	0	1

Dentro de cada evento chuvoso (definido à escala temporal do dia) poderão ser identificados diferentes acontecimentos pluviosos, que é definido por “período de chuva (precipitação) separado do precedente e do seguinte de pelo menos 6 h” (Huff, 1967 e Pereira, 1995).

Procedeu-se, também, à avaliação das falhas dos dados hidrométricos das sete estações hidrométricas (ativas e desativada), no período de análise (31/12/1999 a 31/08/2008), que se apresenta no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 - Avaliação das falhas de registo das sete estações de hidrométricas nos cinco períodos temporais de precipitação.

Estação hidrométrica SNIRH	Código SNIRH	Níveis e caudais médios diários	Níveis hidrométricos instantâneos				
			01/02/2008 a 29/02/2008	01/10/2006 a 30/11/2006	1/11/2005 a 30/11/2005	15/09/2003 a 31/10/2003	01/11/2000 a 31/01/2001
Quinta das Camilas	21A/04H	01/10/1984 a 30/09/1990	Completo				Sem Dados
Estação Agronómica Nacional	21B/02H	01/10/1985 a 30/09/1990	Completo				Sem Dados
Laveiras	21B/03H	01/01/1987 a 30/09/1990	Completo				Sem Dados
Senhora da Rocha	21B/04H	01/10/1988 a 30/09/1990	Completo				Sem Dados
Ponte Pinhal	21C/01H	01/10/1977 a 30/09/1989	Completo				Sem Dados
Colares	21A/05H	01/10/1986 a 30/09/1990	Sem dados	Completo			Sem Dados
Ponte Zambujal	20C/02H	-	Desativada			Completo	Sem Dados

O número dos períodos temporais de precipitação, dos eventos chuvosos e dos acontecimentos pluviosos, está condicionado ao intervalo temporal da análise na área de estudo, tendo sido observadas cheias com alguma expressão apenas nos anos hidrológicos de 2000/01, 2006/07 e 2007/08. Portanto, os acontecimentos pluviosos selecionados, que cumprem os critérios meteorológicos adotados mas não correspondem a registos associados a cheias históricas (e.g., os acontecimentos pluviosos de 2003 e 2005), poderão ou não produzir escoamento relevante nas secções de análise. Por outro lado, a automatização das redes de monitorização da Autoridade Nacional da Água iniciou-se em 2001 e, como tal, a generalidade das estações não tinha sido automatizada aquando da ocorrência da potencial cheia de 2000/01, pelo que não existe grande parte dos registos hidrometeorológicos para este período.

Face aos dados disponíveis, poder-se-á concluir:

- Uma vez que não existem dados hidrométricos para o período temporal 01/11/2000 a 31/01/2001, os 21 eventos chuvosos registados neste período não serão objeto de calibração hidrológica e, como tal, os 41 eventos chuvosos inicialmente estimados passam a contabilizar 20 eventos. Os acontecimentos pluviosos selecionados são identificados pela data onde ocorre o pico do hidrograma (Quadro 2.9).
- Uma vez que existe uma ausência generalizada de dados de precipitação entre o final de 2000 e início de 2001, tanto para a rede de monitorização do IPMA, I.P. como da Autoridade Nacional da Água, prevê-se, associado a este período, condicionamentos na análise hidrológica e na avaliação do funcionamento e na calibração do radar meteorológico.

Quadro 2.9 – Identificação dos acontecimentos pluviosos em cada evento chuvoso associado às sete estações hidrométricas.

Períodos temporais	Nº total de eventos chuvosos	Quinta das Camilas	Estação Agronómica Nacional	Laveiras	Senhora da Rocha	Ponte Pinhal	Colares	Ponte Zambujal
1/11/2000 a 31/01/2001	21	(-)						
15/09/2003 a 31/10/2003	5	1/10/2003; 12/10/2003; 25/10/2003; 27/10/2003; 31/10/2003 (5 acontecimentos pluviosos)						
1/11/2005 a 30/11/2005	4	3/11/2005; 19/11/2005 a 20/11/2005 (2 máximos); 21/11/2005 (3 acontecimentos pluviosos)						(-)
1/10/2006 a 30/11/2006	10	20/10/2006; 25/10/2006; 26/10/2006; 16/11/2006; 24/11/2006; 27-28/11/2006 (6 acontecimentos pluviosos) 16/10/2006; 18/10/2006; 23/10/2006; 25/11/2006 (4 acontecimentos pluviosos)						(-)
1/02/2008 a 28/02/2008	1	18/02/2008 (1 acontecimento pluvioso)						(-)

No **Anexos 2 e 3** apresentam-se os dados meteorológicos e hidrométricos (precipitações e níveis hidrométricos horários) associados aos períodos temporais selecionados e registados na rede de monitorização da APA, I.P., e disponibilizados no portal do SNIRH (<http://snirh.pt>).

Com o intuito de avaliar o funcionamento das estações selecionadas da APA, I.P., fez-se uma análise da consistência e/ou homogeneidade das séries anuais de precipitação, recorrendo à determinação da evolução temporal do seu valor médio (Fig. 2.4), à análise das suas curvas de dupla acumulação e à avaliação dos resultados do método dos resíduos acumulados (**Anexo 4**). A eventual falta de consistência e/ou de homogeneidade significa que os seus registos estarão influenciados por fatores climáticos, por existência de obstáculos, por alteração das condições de medição da variável ou por deficiência no processo de registo, afetando a grandeza dos valores medidos. Esta avaliação foi efetuada para as estações da APA, I.P., para as quais estão disponíveis a qualquer utilizador a totalidade das séries históricas e sem qualquer verificação relativa à sua credibilidade funcional, aspecto avaliado nas séries históricas das estações do IPMA, I.P..

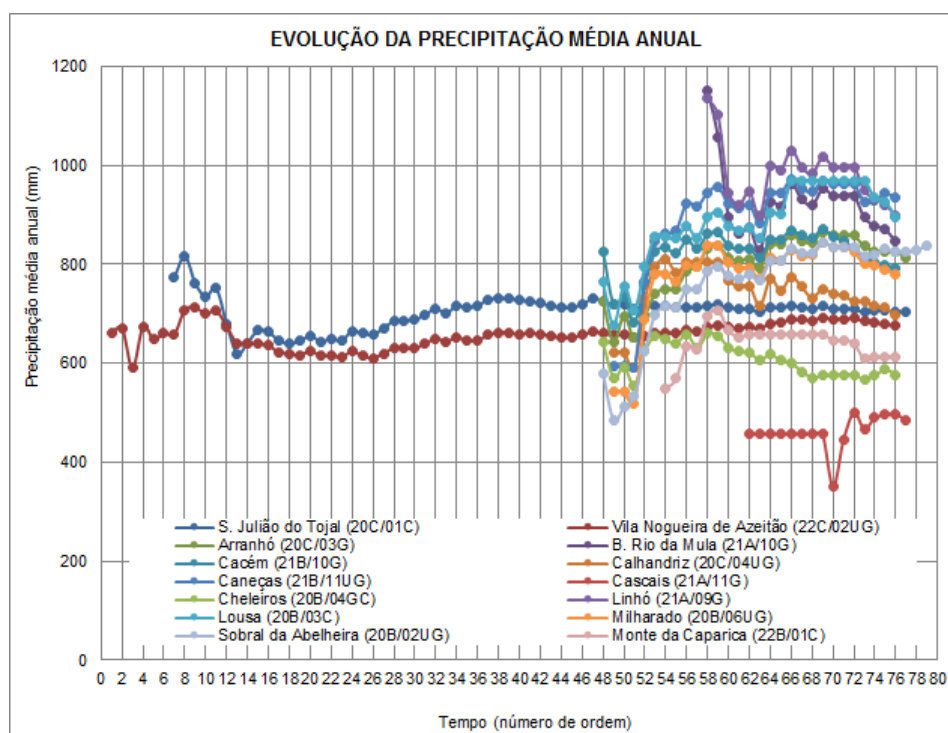


Figura 2.4 – Evolução temporal das precipitações médias anuais para 14 estações meteorológicas do SNIRH.

As estações Lisboa (INAG) e Malveira da Serra foram excluídas da análise porque não possui série histórica anual ou a série inclui menos de cinco anos de registo, respetivamente. Nas outras estações as falhas anuais foram preenchidas com o somatório das precipitações mensais, quando existiam registos com mais de seis meses e abrangendo a maioria do semestre húmido; caso não se reunissem estas condições não foram preenchidas. Foram identificadas 80 falhas anuais (17,7 % das precipitações anuais em análise), sendo 46,3 % preenchidas, sendo o período de análise compreendido entre o início de funcionamento de cada estação e o ano hidrológico 2007/08. Deste modo, é possível verificar de forma mais sustentada a consistência e/ou homogeneidade das séries histórica das precipitações registadas na rede de monitorização da APA, I.P..

No método dos valores duplamente acumulados comparam-se graficamente os valores de precipitação acumulada da estação de interesse (ordenadas) com os valores acumulados de precipitação anual média das estações mais próximas, consideradas homogéneas (abscissas). Haverá homogeneidade e/ou consistência dos valores da estação analisada quando houver uma tendência linear entre ambas as séries de valores acumulados. Embora seja um método gráfico, esta linearidade pode ser avaliada pelo ajuste da equação da reta de regressão da série de valores acumulados da estação em análise sobre a série de valores acumulados da série de precipitação média das estações homogéneas e consistentes, e do respetivo coeficiente de determinação. Com base na evolução temporal da precipitação média anual (Fig. 2.4) considerou-se que as séries medidas nas estações de São Julião do Tojal e de Vila Nogueira de Azeitão, que são, simultaneamente, as séries mais longas, eram homogéneas e consistentes, por aparentarem ter atingido o patamar representativo da precipitação média anual das respetivas populações. Assim, no teste dos valores duplamente acumulados, as séries a analisar foram comparadas com a série de precipitações anuais constituída pela média das séries daquelas duas estações. A curva de dupla acumulação que revela uma pequena oscilação em torno da reta de regressão está associada à estação de Cheleiros, sem contudo corresponder a uma falha de consistência e/ou homogeneidade.

O método dos resíduos acumulados baseia na análise dos resíduos observados (e_i), que consistem na diferença entre o valor estimado e o valor observado, expressos por:

$$e_i = P_{ai} - \hat{P}_{ai} = P_{ai} - (a_r + b_r P_{ahi}) \quad (2.1)$$

sendo, P_{ai} , \hat{P}_{ai} e P_{ahi} a precipitação anual do ano i , da estação em análise, a precipitação anual estimada do ano i , da estação em análise, e a precipitação anual do ano i , da série anual homogénea, respetivamente. As constantes a_r e b_r resultam da regressão linear das precipitações anuais da série em análise (variável dependente) sobre as precipitações anuais homogéneas (variável independente). Seguidamente, determina-se a evolução temporal dos valores acumulados destes resíduos, $\sum_{i=1}^{N_x} e_i$, os quais são posteriormente comparados com a elipse $\sum_{i=1}^{N_x} e_i (\alpha_1)$, definida por:

$$\sum_{i=1}^{N_x} e_i (\alpha_1) = \mp \frac{2Z_{1-\alpha_1/2} S_e}{\sqrt{N_x-1}} \sqrt{\left(\frac{N_x}{2}\right)^2 - \left(i - \frac{N_x}{2}\right)^2} \quad (2.2)$$

onde, N_x é o número total de valores da série de dados, $z_{1-\alpha_1/2}$ é a normal padronizada a que corresponde uma probabilidade de não excedência de $1-\alpha_1/2$ e S_e é o desvio-padrão dos resíduos. Nesta análise foi considerado um α_1 igual a 0,05, a que corresponde uma probabilidade de não excedência de 0,95.

Quando os resíduos estão todos circunscritos à elipse não se rejeita a hipótese de os resíduos terem uma distribuição normal, pelo que não se rejeita a hipótese de a série anual em análise ser homogênea, razão pela qual as 14 séries analisadas serem consideradas homogêneas, como se pode observar no **Anexo 4.2**.

2.4. Avaliação das curvas de vazão

A conversão dos níveis hidrométricos em caudais instantâneos efetuou-se através da aplicação da última curva de vazão associada a cada estação hidrométrica. Para as estações de Colares, Laveiras, Quinta das Camilas e Estação Agronómica Nacional as curvas de vazão dizem respeito ao final da década de noventa, enquanto que para Ponte Pinhal e Senhora da Rocha, como têm medições de caudal mais recentes e próximas do período de análise (2010/11), propõe-se a utilização de curvas de vazão mais atuais. Considerando ser relevante efetuar uma pré-validação das curvas de vazão, procedeu-se à sua representação gráfica, a qual poderá evidenciar alguma inconsistência das curvas de vazão face às medições de caudal que suportam a sua determinação, permitindo, eventualmente, propor melhorias. No Quadro 2.10 apresenta-se informação complementar relevante, associada às sete estações hidrométricas, que permitirá auxiliar na avaliação das curvas de vazão e da qualidade dos dados hidrométricos. Considerando que existem diferenças temporais significativas entre a data associada às curvas de vazão e ao período de análise do presente estudo, aquelas poderão não ser aplicáveis, caso tenha ocorrido uma alteração das condições de escoamento nas respetivas secções, constituindo esta análise uma oportunidade para efetuar a sua validação. Neste quadro indicam-se, também, os níveis hidrométricos a partir dos quais o escoamento inunda o leito maior, obtidos da caracterização da geometria transversal das secções das estações hidrométricas em funcionamento, representada nos esboços reproduzidos no **Anexo 6**.

Quadro 2.10 – Informação complementar relevante associada às sete estações hidrométricas.

Estação hidrométrica SNIRH	Código SNIRH	Com escala	Número de curvas de vazão	Ano da última curva de vazão	Nível máximo de validade da curva de vazão (m)	Número de medições de caudal	Cota do zero escala (m)	Nível hidrométrico a partir do qual inunda o leito maior (m)
Quinta das Camilas	21A/04H	Sim	7	1987/88 a 1989/90	1,5	106	Sem	2,30
Estação Agronómica Nacional	21B/02H	Sim	5	1989/90	1,5	65	Sem	4,00
Laveiras	21B/03H	Sim	2	1989/90	1,9	39	Sem	4,00
Senhora da Rocha	21B/04H	Sim	3	2010/11	1,65	46	14,68 (17/05/2011-)	2,61
Ponte Zambujal	20C/02H	Não	0	(-)	(-)	1	Sem	(-)
Ponte Pinhal	21C/01H	Sim	14	2010/11	2,39	214	3,61 (28/06/1982-29/06/1982)*; 2,67 (30/06/1982-03/10/2001); 2,662 (04/10/2001-16/05/2011); 2,527 (17/05/2011-)	4,93
Colares	21A/05H	Sim	4	1989/90	2,0	31	Sem	4,0

Legenda: * – Secção de jusante da estação hidrométrica.

As representações gráficas das últimas curvas de vazão (1989/90), em conjugação com as medições de caudal realizadas ao longo do seu período de funcionamento, relativas às estações de Laveiras e Colares, validam as mesmas, uma vez que traduzem a distribuição das medições de caudal que estão na base da sua determinação (Fig. 2.5).

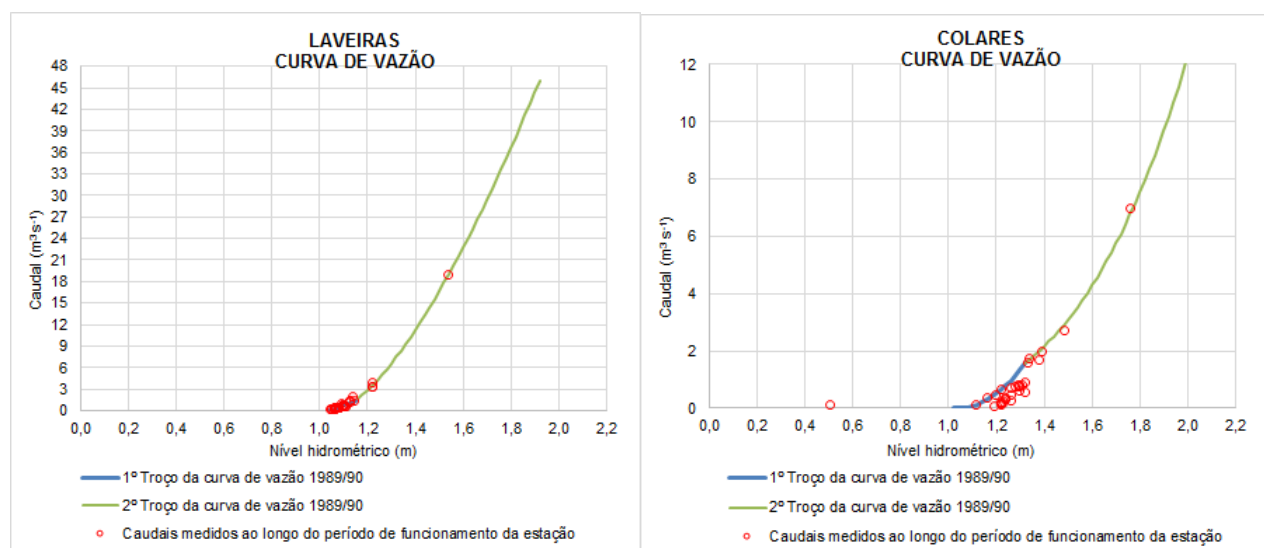


Figura 2.5 – Representação das últimas curvas de vazão das estações hidrométricas de Laveiras e Colares (1989/90) e das medições de caudal.

A representação gráfica da última curva de vazão da Estação Agronómica Nacional (1989/90) permite validar o 1º troço desta. Contudo, existem medições de caudal que permitem determinar um segundo troço alternativo, que poderá melhor descrever a relação entre os caudais medidos e os níveis hidrométricos superiores a 1 m (Fig. 2.6). Com este objetivo, estimou-se o 2º troço alternativo que resulta de um ajustamento a uma função

potencial aos sete maiores caudais medidos (superiores a $4,59 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), não excluindo nenhuma medição (Quadro 2.11). A utilização do 2º troço alternativo reduz significativamente o valor do caudal estimado, sendo que esta proposta só será aplicada a níveis registados a partir da automatização da rede de monitorização e até ao limite em que o escoamento apenas se realiza no leito menor da secção (4,0 m).

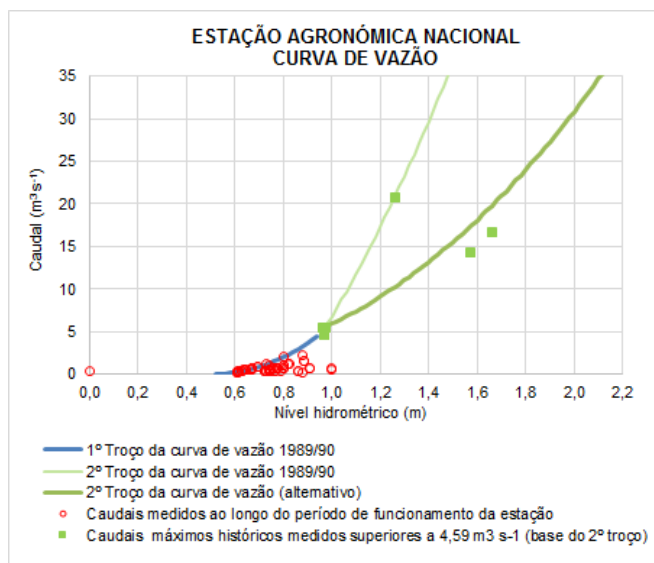


Figura 2.6 – Representação da última curva de vazão da estação hidrométrica de Estação Agronómica Nacional (1989/90) e das medições de caudal.

As medições de caudal efetuadas em 2010/11 nas estações hidrométricas de Senhora da Rocha e Ponte Pinhal permitiram determinar curvas de vazão que melhor caracterizam as condições hidráulicas das secções atuais, mesmo que não abranjam uma grande amplitude de caudais. Ambas as curvas de vazão foram baseadas em medições de caudal realizadas com o apoio da Autoridade Nacional da Água (INAG), recorrendo a diversos equipamentos de medição (sensor eletromagnético e ADCP- *Acoustic Doppler Current Profiler*, tipo *Stream Pro*), e verificadas por um procedimento hidráulico (Alves, 2011). Uma vez que os caudais medidos, de suporte a estas duas curvas de vazão, não são elevados, não permitem o seu prolongamento visando a aplicação à totalidade dos registos hidrométricos em análise. Para efetuar o prolongamento destas curvas utilizaram-se as estimativas de caudal obtidas por aplicação da fórmula de Manning-Strickler (Eq. (4.49)), associadas ao nível hidrométrico a partir do qual se inunda o leito maior (Quadro 2.10), aos declives do talvegue nas proximidades da estação hidrométrica e aos coeficientes de Manning-Strickler característico da zona em avaliação.

A curva de vazão atual de Senhora da Rocha é válida até ao nível hidrométrico de 1,65 m, a partir da qual se determinou um segundo troço da curva de vazão válido até ao nível de 2,61 m (Quadro 2.11). O segundo troço foi determinado considerando, respetivamente, o declive do talvegue e o coeficiente de Manning-Strickler de 0,01316 e de $2,428 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ (Alves, 2011) (Fig. 2.7).

Quadro 2.11 – Novas curvas de vazão (Quinta das Camilas) ou novos troços de curvas de vazão (Estação Agronómica Nacional, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal).

Estação hidrométrica SNIRH	Código SNIRH	Identificação	Nível inicial de aplicação (m)	Nível final de aplicação (m)	Caudal máximo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Quinta das Camilas	21A/04H	Nova curva de vazão $Q=4,064(h-0,01)^{1,863}$	0,08	2,30	19,0
Estação Agronómica Nacional	21B/02H	2º Troço $Q=5,897(h-0,00)^{2,387}$	0,95	4,00	161,3
Senhora da Rocha	21B/04H	2º Troço $Q=13,074(h-1,26)^{2,265}$	1,65	2,61	25,8
Ponte Pinhal	21C/01H	2º Troço $Q=11,403(h-1,67)^{1,577}$	2,39	5,80	106,2

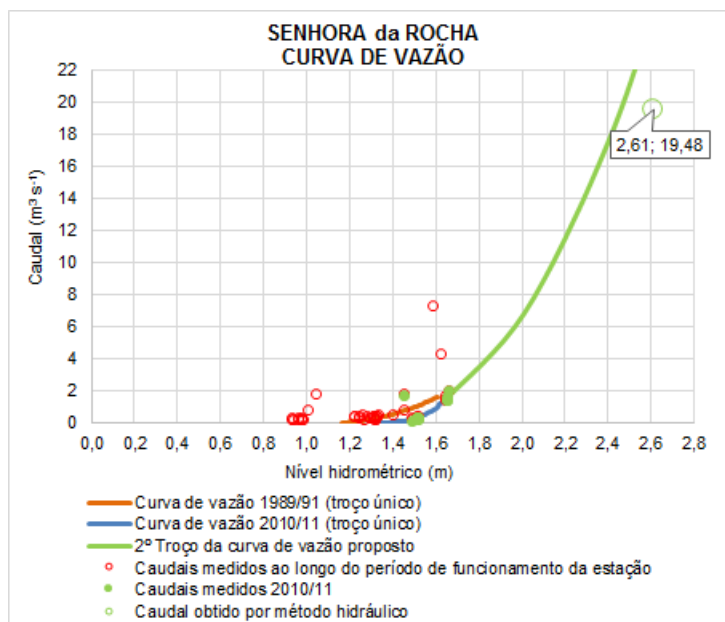


Figura 2.7 – Representação das curvas de vazão da estação hidrométrica de Senhora da Rocha (1989/91 e proposta de curva de vazão), das medições de caudal e da estimativa de caudal por método hidráulico.

À estação de Ponte Pinhal foi necessário referenciar os níveis hidrométricos à realidade atual de 2011, pelo que os níveis originais foram alterados, adicionando ao nível original a diferença entre as cotas dos zero das escalas. Esta estação estava originalmente associada a duas secções (montante e jusante), tendo sido abandonada a de jusante, e ao longo do tempo foram efetuados levantamentos topográficos à cota do zero da escala que permitiram melhorar a sua precisão. Simultaneamente, ocorreram alterações substanciais na secção, estando, atualmente, mais assoreada e influenciada por jusante, como resultado das várias intervenções que a zona tem sofrido, nomeadamente, as associadas à construção da CRIL (Fig. 2.8). A curva de vazão atual é válida até ao nível hidrométrico de 2,39 m, a partir da qual se definiu o 2º troço da curva de vazão válida até a altura de cerca de 5,8 m (Quadro 2.11). A curva de vazão atual é bastante diferente da antiga curva de vazão, sendo que o mesmo caudal é associado a níveis hidrométricos maiores do que os do passado, refletindo o assoreamento da zona em avaliação (Fig. 2.9). O segundo troço foi determinado considerando, respetivamente, o declive do talvegue e o coeficiente de Manning-Strickler de 0,0128 (medição de campo) e de cerca de $8 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ (combinação de várias realidades, sendo um troço fluvial, com mato médio a denso no verão e corrente que pode alcançar a rama de arbustos, Lencastre, 1991).



Figura 2.8 – Aspeto do enchimento do leito da ribeira da Costa de 18 de fevereiro de 2008, no início do troço retilíneo regularizado, logo após a curva por baixo da CRIL, em que a capacidade de vazão do leito regularizado foi praticamente preenchida para uma cheia com o período de retorno abaixo dos 100 anos (Informação nº Int/DMSIDH/2011/44 de 15 de junho de 2011).

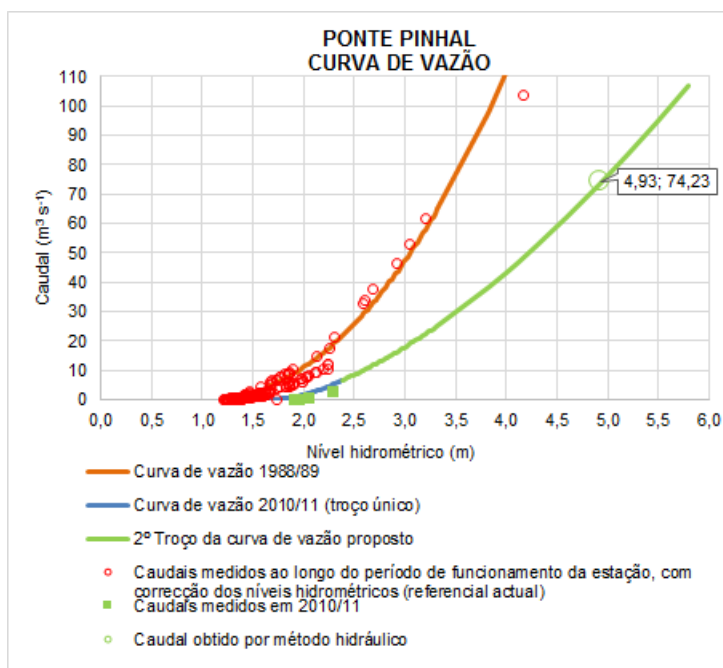


Figura 2.9 – Representação das curvas de vazão da estação hidrométrica de Ponte Pinhal (1988/89 e 2010/11), das medições de caudal e da estimativa de caudal por método hidráulico.

Ao representar graficamente a curva de vazão associada à estação de Quinta das Camilas, com período de validade mais recente, verifica-se que esta afasta-se dos caudais medidos. Nomeadamente, o mesmo caudal medido apresenta uma tendência ao longo do registo histórico para estar associado a nível hidrométrico cada vez maior. O estado físico da secção evidencia um assoreamento e uma ocupação por vegetação diversa de grande porte, o que potencia este fenómeno (Fig. 2.10 e **Anexo 1**). Este aumento do nível hidrométrico para o mesmo caudal fica caracterizado no novo ajustamento que foi efetuado para a curva de vazão (1988/89 a 1989/90), onde foram utilizadas as últimas dezassete medições de caudal realizadas nestes anos hidrológicos (Fig. 2.11). Contudo, esta avaliação não permite verificar a validade da curva de vazão para caudais elevados, sendo aplicada até ao nível 2,3 m, nível hidrométrico em que o escoamento ocorre apenas no leito menor (Quadro 2.11).



Figura 2.10 – Zona da estação hidrométrica de Quinta das Camilas.

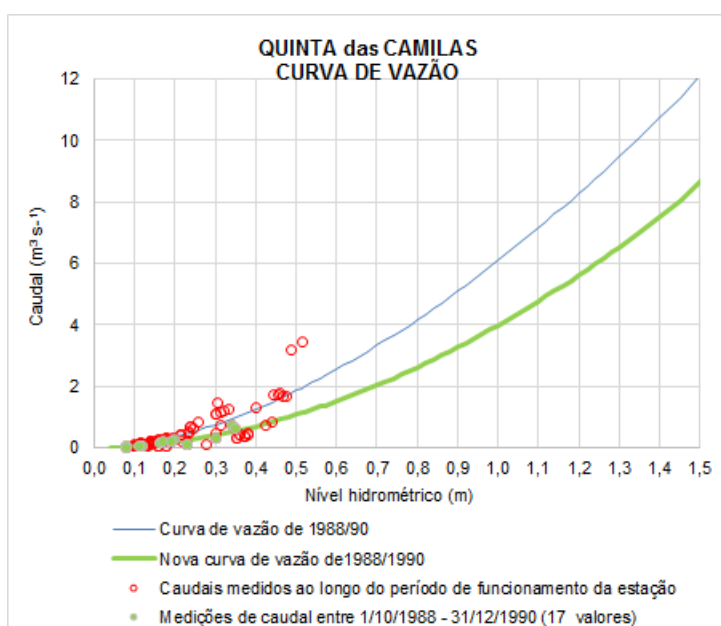


Figura 2.11 – Representação da última curva de vazão da estação hidrométrica de Quinta das Camilas e das medições de caudal.

As curvas de vazão e as medições de caudal associadas às seis estações hidrométricas em análise são apresentadas no **Anexo 5**, exceto a curva de vazão de Ponte Zambujal, que não foi determinada, visto existir apenas uma medição de caudal. A nova curva de vazão e os novos troços das curvas de vazão apresentam-se no Quadro 2.11.

A análise das curvas de vazão permite concluir:

- Uma vez que as curvas de vazão não são obtidas especificamente para os períodos temporais da análise deste estudo, os resultados a obter na avaliação hidrológica, no processo de determinação dos hidrogramas unitários, poderá ser dificultado.
- Uma vez que as curvas de vazão para estimar caudais elevados são, geralmente, suportadas por poucas medições ou nenhuma, a incerteza poderá ser maior, sendo mais uma razão para que estas curvas possam vir a ser retificadas aquando da determinação dos hidrogramas unitários. A existência de poucas medições associados a caudais elevados justifica-se por estes serem menos frequentes e pela falta de recursos humanos habilitados para realizarem as medições de caudal.

- Uma vez que a estação de Ponte Zambujal não tem curva de vazão, a bacia hidrográfica definida nesta estação será simulada hidrológicamente sem calibração de parâmetros, ao contrário das restantes estações, que serão calibradas com base nas observações de caudais existentes.

2.5. Informação sinóptica e dados sinópticos e do radar meteorológico em Cruz do Leão

O IPMA, I.P. e a Administração de Região Hidrográfica do Tejo (ARH – Tejo) disponibilizaram a estimativa da intensidade de precipitação horária (obtida através da integração temporal das intensidades estimadas a partir da conversão, com a relação de Marshall e Palmer, 1948, das refletividades medidas) em Cruz de Leão (Quadro 2.12), para alguns dos períodos temporais selecionados pelos critérios anteriormente descritos, e para outros períodos temporais não incluídos na seleção.

Quadro 2.12 – Dados do radar meteorológico em Cruz do Leão.

Períodos temporais	Dias com precipitação horária - (RAIN1 - Sem qualquer fator de correção em função do alcance do radar)	Número de eventos chuvosos
Setembro de 2003	30	1
Outubro de 2003	1 a 2, 11(+), 15 a 16 (*), 18 a 19 (*), 24 a 27, 30 a 31	6
Outubro de 2006	2 (*), 16, 17, 18 a 19, 22 e 25	6
Novembro de 2006	2 a 7 (*), 15 a 16, 17 a 18, 23 a 25 e 27 a 28	5
Dezembro de 2006	2 (*), 5 (*) e 7 a 8 (*)	3
Fevereiro de 2008	17 a 18	1

Legenda: * Períodos não incluídos na modelação hidrológica; + Período potencialmente responsável pelo acontecimento pluvioso a modelar de 12/10/2003.

O IPMA, I.P. disponibilizou, também, a descrição da situação sinóptica associada a 22 eventos chuvosos (**Anexo 7**). As diferentes situações sinópticas foram classificadas em três tipologias, consoante o fenómeno meteorológico responsável pela precipitação:

- Tipo 1 – situação de ciclone ou depressionária (ou centro de baixa pressão, *B*) e anticiclone (centro de alta pressão, *A*), com superfícies frontais (chuva, chuveiro).
- Tipo 2 – situação de ciclone ou depressionária (ou centro de baixa pressão, *B*) e anticiclone (centro de alta pressão, *A*), sem superfícies frontais (chuva, chuveiro).
- Tipo 3 – Situação depressionária complexa.

Entre os 22 eventos chuvosos, onze estão associados ao tipo 1, oito ao tipo 2 e três ao tipo 3.

Na Fig. 2.12 apresenta-se um exemplo de uma imagem do radar de Cruz de Leão e a sobreposição das sete bacias hidrográficas em análise.

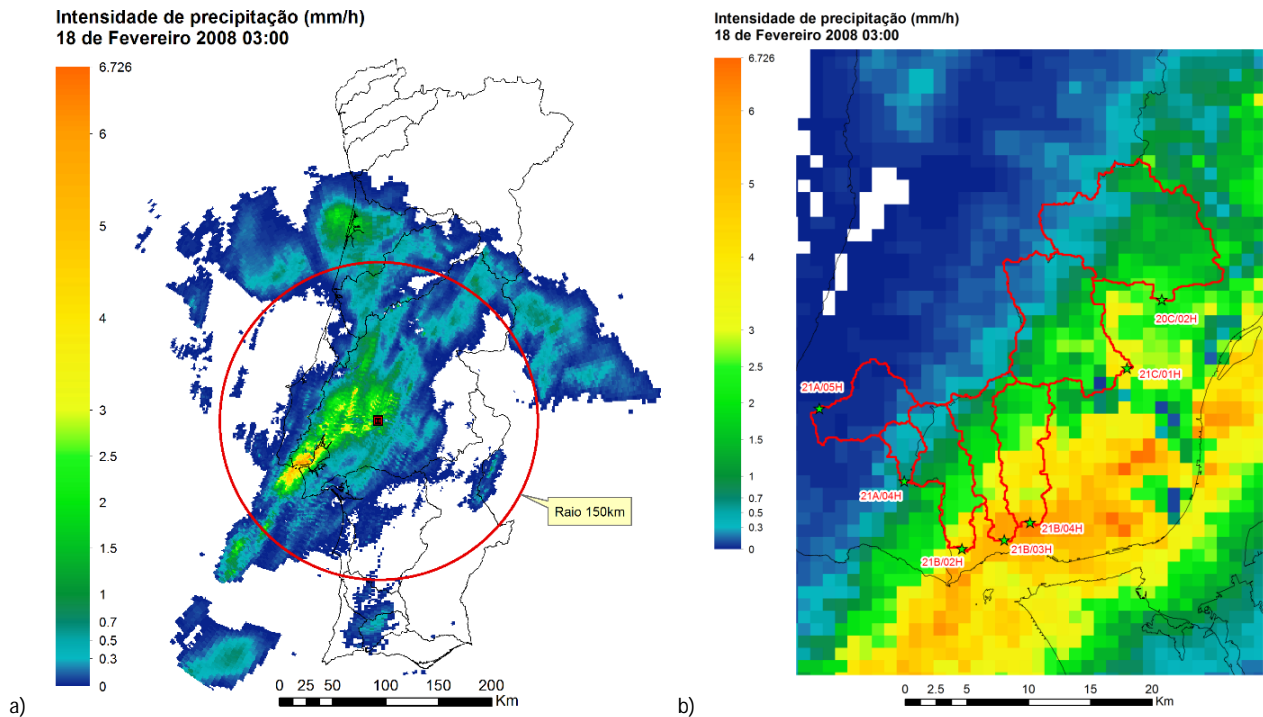


Figura 2.12 – a) Imagem do radar de Cruz de Leão associada ao dia 18/02/2008 (03:00h); b) pormenor e sobreposição da imagem do radar de Cruz de Leão com os perímetros das sete bacias hidrográficas analisadas (ribeira de Barcarena, ribeira de Loures, rio Trancão, ribeira de Colares, ribeira de Caparide, ribeira da Laje e rio Jamor).

2.6. Caracterização espacial da precipitação nas bacias hidrográficas com base nos dados das estações udográficas

Ao contrário da caracterização pontual e temporal da precipitação, a caracterização contínua em termos espaciais é apenas possível de obter em termos de estimativa, pois não existem medições sobre a totalidade da superfície a caracterizar. A distribuição espacial da precipitação pode ser estimada por diversos métodos que recorrem aos pontos de observação (estações com medição de precipitação) e a partir dos quais se determina uma média ponderada (modelo agregado), ou ser estimada através da conjugação de imagens de satélite ou de radar meteorológico com as precipitações pontuais observadas, de modo a obter-se a precipitação à escala espacial das imagens utilizadas (modelo distribuído), a partir da qual poderá ser quantificada para uma determinada área (modelo agregado).

As estimativas da precipitação sobre uma região, independentemente da forma como são obtidas, dependem do número de estações localizadas na zona, da sua representatividade e de os registos serem suficientemente longos para caracterizarem os parâmetros estatísticos da zona.

Singh (1975 e 1989) comparou os resultados decorrentes da aplicação de nove métodos de interpolação espacial, considerando cinco zonas hidrológicas (duas no Novo México, uma na África do Sul e duas no Reino Unido), tendo concluído que estes eram semelhantes e que os resultados dos métodos mais simples eram equivalentes aos resultados obtidos pelos métodos mais sofisticados, embora numa situação específica um determinado método possa ser mais adequado. Os métodos analisados foram a) Média aritmética; b) Média ponderada em função das altitudes de determinadas áreas (*Grouped Area-Aspect Weighted Mean*); c) método

dos Polígonos de Thiessen; d) Média ponderada por polígonos definidos em função da altitude (*Individual Area-Altitude Weighted Mean*); e) Média ponderada de área triangular (*Triangular Area Weighted Mean*); f) Método de Myers; g) Método das Isoietas; h) Análise de Superfície de Tendência; i) Método do Inverso do Quadrado da Distância.

Singh e Chowdhury (1986, in Chow, *et al.*, 1988) estudaram vários métodos, como o dos Polígonos de Thiessen, o método das isoietas e o IDW (*Inverse Distance Weighted*), entre outros, para estimar a distribuição espacial da precipitação, tendo concluído que estes produzem resultados equivalentes, especialmente quando a duração do intervalo de tempo de acumulação da precipitação é grande, ou seja, os métodos diferentes variam mais entre eles quando aplicados a dados diários de precipitação que quando aplicados a dados anuais. Warren, Viessman e Lewis (1995) referem que, independentemente do método utilizado para obter a precipitação numa determinada área, deverá ser considerada na avaliação do valor da precipitação obtida, a distância entre a estação de observação da precipitação e o local para o qual se estimou a precipitação. Mencionam, ainda, que em regiões montanhosas as distâncias verticais podem ser mais importantes do que as horizontais, enquanto nas planícies os espaçamentos horizontais são o mais importante.

Neste estudo são utilizados dois métodos para obtenção da precipitação média em área, P_A (ambos modelos agregados): a) dos Polígonos de Thiessen e b) do inverso da potência da distância dos locais de observação, com acrónimo IDW.

O método dos Polígonos de Thiessen considera que a precipitação observada numa estação se distribui uniformemente no espaço na sua área de influência (o Polígono de Thiessen), cujos pontos estão mais próximos dessa estação do que de qualquer outra. A aplicação do método segue os seguintes passos:

- Unem-se as estações adjacentes, na zona em análise, por segmentos de reta, formando triângulos cujos lados não se podem intersectar.
- Traçam-se as mediatrizes de cada segmento de reta.
- Prolongam-se as mediatrizes de cada triângulo até ao ponto de intersecção.
- As mediatrizes definem Polígonos (de Thiessen) que contêm cada estação de medição de precipitação. A intersecção da zona em análise com os Polígonos de Thiessen define a área de influência de cada estação, A_i (Fig. 2.13).
- A precipitação média em área (mm) é dada pela média ponderada:

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_e} A_i P_i}{\underbrace{\sum_{i=1}^{N_e} A_i}_A} = \sum_{i=1}^{N_e} p_i P_i \quad (2.3)$$

em que P_i é a altura da precipitação observada na estação de monitorização i (mm), N_e é o número de estações de monitorização utilizadas, A é a área da bacia hidrográfica em análise e os pesos p_i , associados a cada uma das estações, são dados por:

$$p_i = \frac{A_i}{A} \quad (2.4)$$

A área obtida pelo método do Polígono de Thiessen define a influência de cada estação correspondendo à zona geográfica cuja altura da precipitação se considera ser igual ao valor registado na respetiva estação.

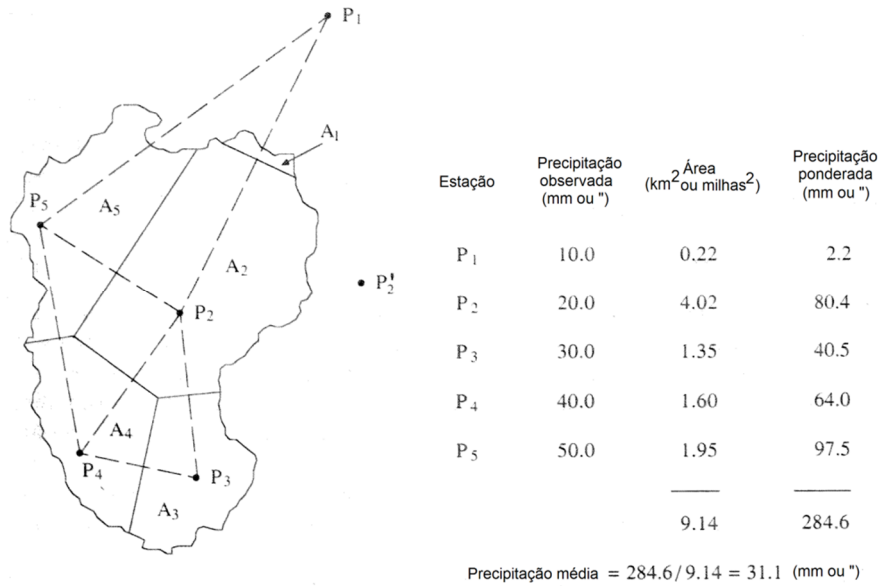


Figura 2.13 - Método dos Polígonos de Thiessen (adaptado de Chow, et al., 1988).

No método de inverso da distância (método IDW) a precipitação média em área resulta da média das precipitações estimadas nos nós de uma malha regular espacial sobreposta à bacia (ou no centro de cada malha), em que a precipitação em cada nó é estimada com a média ponderada das observações vizinhas, sendo os pesos de cada observação o inverso da potência da distância entre o nó e o local da observação. A relação inversamente proporcional conduz a que, quanto maior a for distância ao ponto com observações, menor seja o peso que este tem na média ponderada, como seria de esperar.

Assim, neste método, a altura da precipitação em cada nó n_o , P_{no} (mm), é estimada com a expressão:

$$P_{no} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_e} \left(\frac{1}{d_i^f} \right)} \sum_{i=1}^{N_e} \left(\frac{1}{d_i^f} \right) P_i = \sum_{i=1}^{N_e} p_i P_i \quad (2.5)$$

sendo d_i a distância euclidiana entre o nó e a estação de monitorização i , f o expoente da potência e p_i os pesos associados às N_e estações, vizinhas do nó n_o , dados por:

$$p_i = \frac{\frac{1}{d_i^f}}{\sum_{i=1}^{N_e} \left(\frac{1}{d_i^f} \right)} \quad (2.6)$$

Considerando que a estação i tem coordenadas x_i e y_i , e cada nó as coordenadas x_{no} e y_{no} , a distância d_i é calculada por:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{no})^2 + (y_i - y_{no})^2} \quad (2.7)$$

Desta forma, obtém-se a distribuição espacial da precipitação, à escala da malha considerada, que poderá ser utilizada quer num modelo distribuído quer na estimativa da precipitação média em área.

Para a estimativa da precipitação ponderada em área há que escolher a potência, f , a utilizar. Sabe-se que uma potência baixa tende a suavizar os valores extremos, enquanto uma elevada tende a realçá-los (Conde e Yamamoto, 1996). O valor mais utilizado para f é 2; se esta potência for nula a ponderação corresponde à média aritmética da altura das precipitações nas N_e estações vizinhas (Hipólito e Vaz, 2011). O método IDW quadrático foi indicado como adaptável à determinação de isolinhas de precipitação por alguns autores (Amorim, *et al.*, 2006; Santos e Fragoso., 2010; Viola, *et al.*, 2010; Rodrigues, *et al.*, 2011; Júnior, *et al.*, 2012). Nesta análise optou-se por utilizar o método do inverso da distância de potência igual a 2 (IDW2), com as ponderações da precipitação a recorrerem a seis observações vizinhas, o que corresponde a cerca de 21 % das estações disponíveis (6 estações em 29 estações potencialmente disponíveis).

Para determinar a altura da precipitação ponderada na área recorre-se a uma equação idêntica à Eq. (2.3):

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_{no}} A_{noi} P_{noi}}{\sum_{i=1}^{N_{no}} A_{noi}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{no}} A_{noi} P_{noi}}{A} \quad (2.8)$$

em que P_{noi} é a altura de precipitação estimada em cada nó, A_{noi} é a área de influência associada a cada nó e N_{no} é o número de nós utilizado.

Considerando a diversidade de situações quanto à existência conjunta de dados de precipitação associados aos eventos chuvosos nas várias estações hidrográficas e que as falhas nos registos não foram suplementadas, foram definidas várias combinações de estações na rede de monitorização de precipitação adotada. Para cada combinação definiram-se os polígonos de Thiessen correspondentes e determinaram-se os pesos para o IDW, com potência de dois e seis vizinhos (IDW2-6), para as sete bacias hidrográficas relativas às estações hidrométricas consideradas.

Na Fig. 2.14 sintetizam-se as tipologias identificadas na área de análise, com uma rede de monitorização composta por 29 estações com registos de precipitação (16 da Autoridade Nacional da Água e 13 do IPMA, I.P.). Verifica-se que o número de estações utilizadas simultaneamente é sempre inferior ao número de estações da rede de monitorização adotada, sendo no máximo utilizados dados de 27 estações, o que significa que existem sempre falhas no registo das precipitações. A tipologia Base resulta da combinação das estações que ao longo do período de análise nunca apresentaram qualquer falha no seu registo, sendo composta por três estações (uma da responsabilidade da Agência Portuguesa do Ambiente e duas do IPMA, I.P.).

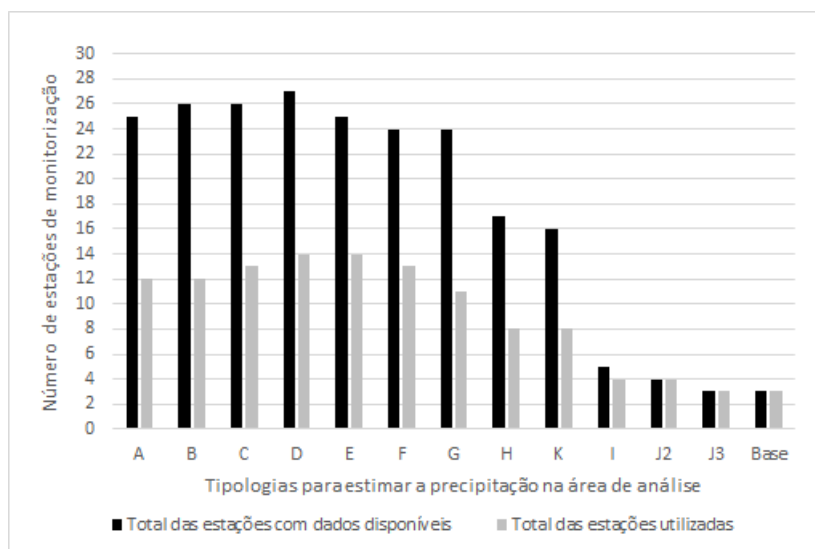


Figura 2.14 – Tipologias para estimar a distribuição espacial da precipitação na área geográfica definida pela totalidade das bacias hidrográficas.

No **Anexo 8** caracterizam-se as tipologias referidas na Fig. 2.14 e no **Anexo 9** indicam-se, para cada tipologia, as áreas de influência (Polígonos de Thiessen) para cada uma das sete bacias hidrográficas consideradas. No Quadro 2.13 identificam-se as tipologias associadas aos eventos chuvosos selecionados.

Quadro 2.13 – Tipologias (ver caracterização no Anexo 7) para estimar a distribuição espacial da precipitação associadas aos eventos chuvosos.

Evento chuvoso	Tipologia	Número de estações utilizadas na área geográfica em análise
22 a 23/11/2000 *	I	4
1/12/2000 *	I	4
7/12/2000 *	J3	3
20 a 22/12/2000 *	J2	4
1/10/2003	H	8
12/10/2003	H	8
25/10/2003	H	8
27/10/2003	K	8
31/10/2003	H	8
3/11/2005	F	13
19/11/2005 a 20/11/2005	G	11
21/11/2005	G	11
16/10/2006	B	12
18/10/2006	B	12
20/10/2006	B	12
22-23/10/2006	C	13
25/10/2006	C	13
26/10/2006	C	13
16/11/2006	D	14
24-25/11/2006	E	14
27-28/11/2006	E	14
18/02/2008	A	12
15 a 19/10/2003 *+	H	8
2/10/2006 *+	B	12
2 a 7/11/2006*+	D	14
2 a 8/12/2006*+	E	14

Legenda: * Período não incluído na modelação hidrológica; + Período com dados de radar

Existem tipologias diferentes que conduzem à mesma ponderação, por conterem estações cuja área de influência não abrange algumas das bacias hidrográficas. Estão nesta situação os seguintes pares de tipologias: E-D, K-H, J2-I. Nas Figs. 2.15 e 2.16 apresenta-se, para dois eventos chuvosos a que correspondem duas diferentes tipologias de estações disponíveis, a distribuição espacial da precipitação horária obtida por aplicação do método IDW2- 6 e dos Polígonos de Thiessen correspondentes a cada tipologia.

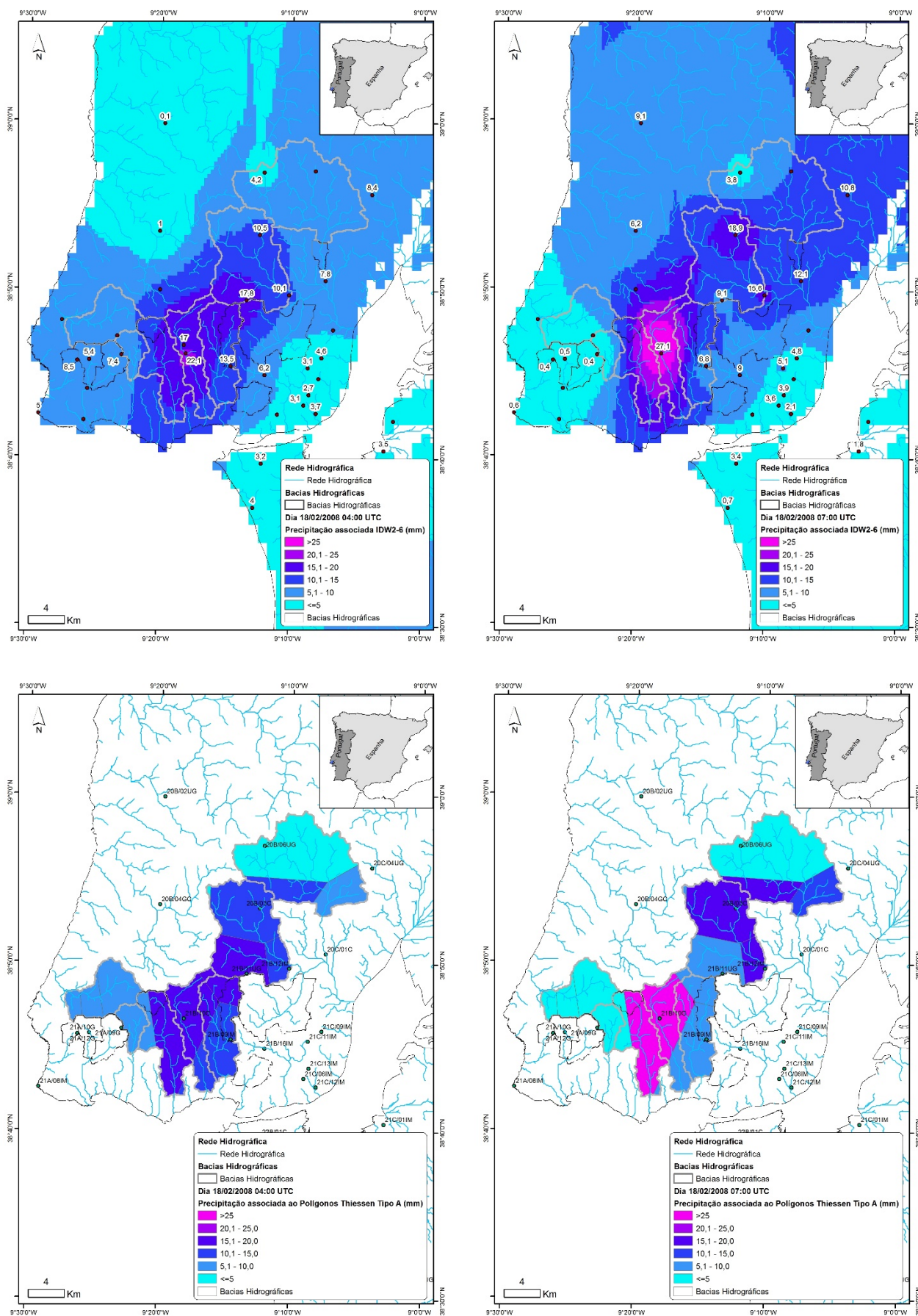


Figura 2.15 – Distribuição espacial da precipitação horária por aplicação dos métodos IDW2-6 e tipologia A dos Polígonos de Thiessen, associados às sete bacias hidrográficas (imagens que correspondem ao 2º e 1º máximo do evento chuvoso de 18 fevereiro de 2008 ocorridos, respetivamente, nas horas 4 UTC e 7 UTC).

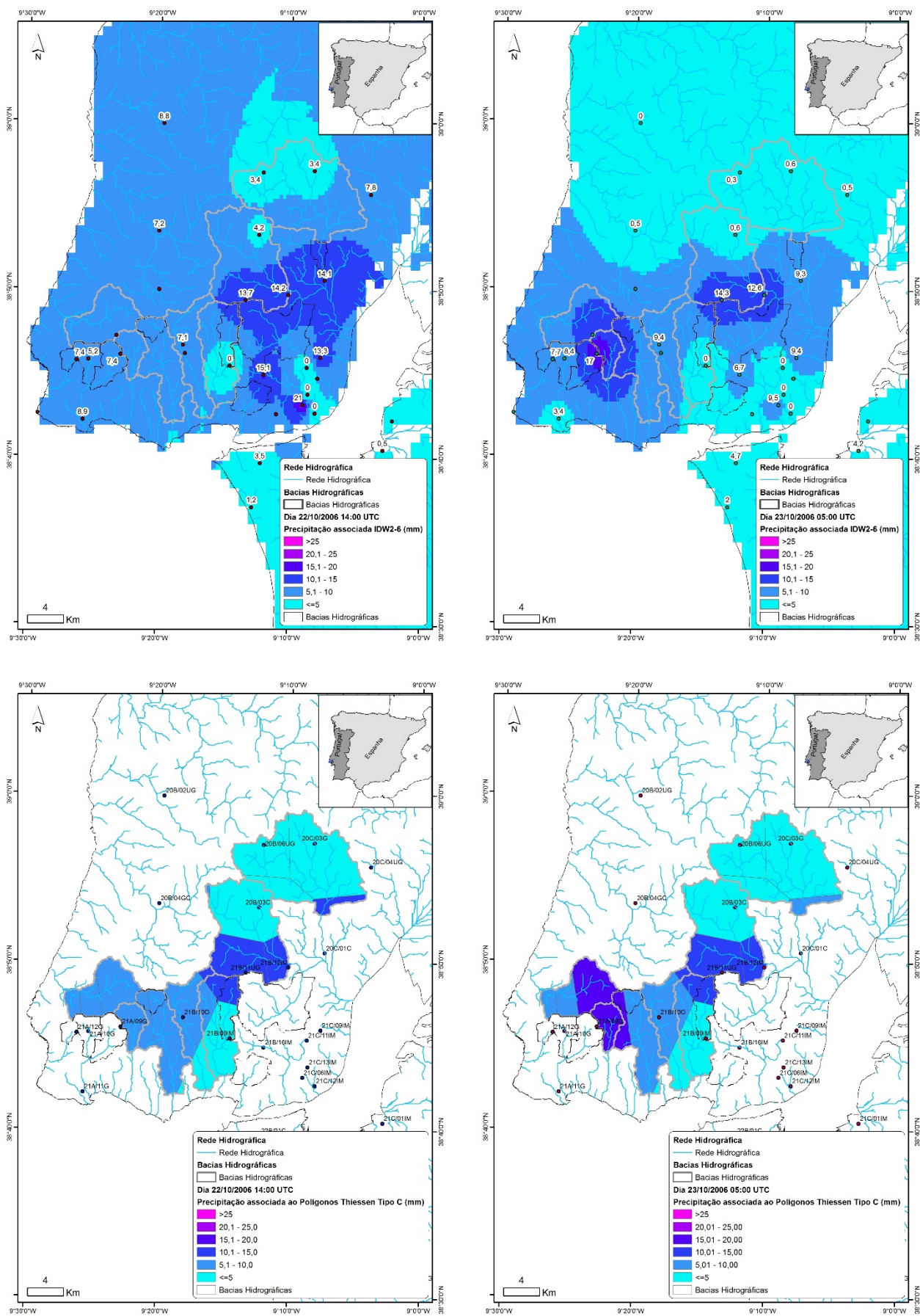


Figura 2.16 – Distribuição espacial da precipitação horária por aplicação dos métodos IDW2-6 e tipologia C dos Polígonos de Thiessen, associado às sete bacias hidrográficas (imagens que correspondem ao 1º e 2º máximo do evento chuvoso de 22-23 de outubro de 2006 ocorridos, respetivamente, nas horas 14 UTC e 5 UTC).

A relação entre as precipitações ponderadas em área, para cada uma das sete bacias hidrográficas e para a área geográfica abrangida pelas sete bacias hidrográficas, obtidas por aplicação dos métodos de Polígonos de Thiessen e do IDW2-6, apresenta-se na Fig. 2.17. Nestes foram considerados os eventos chuvosos utilizados na modelação e simulação hidrológica (Quadro 2.12).

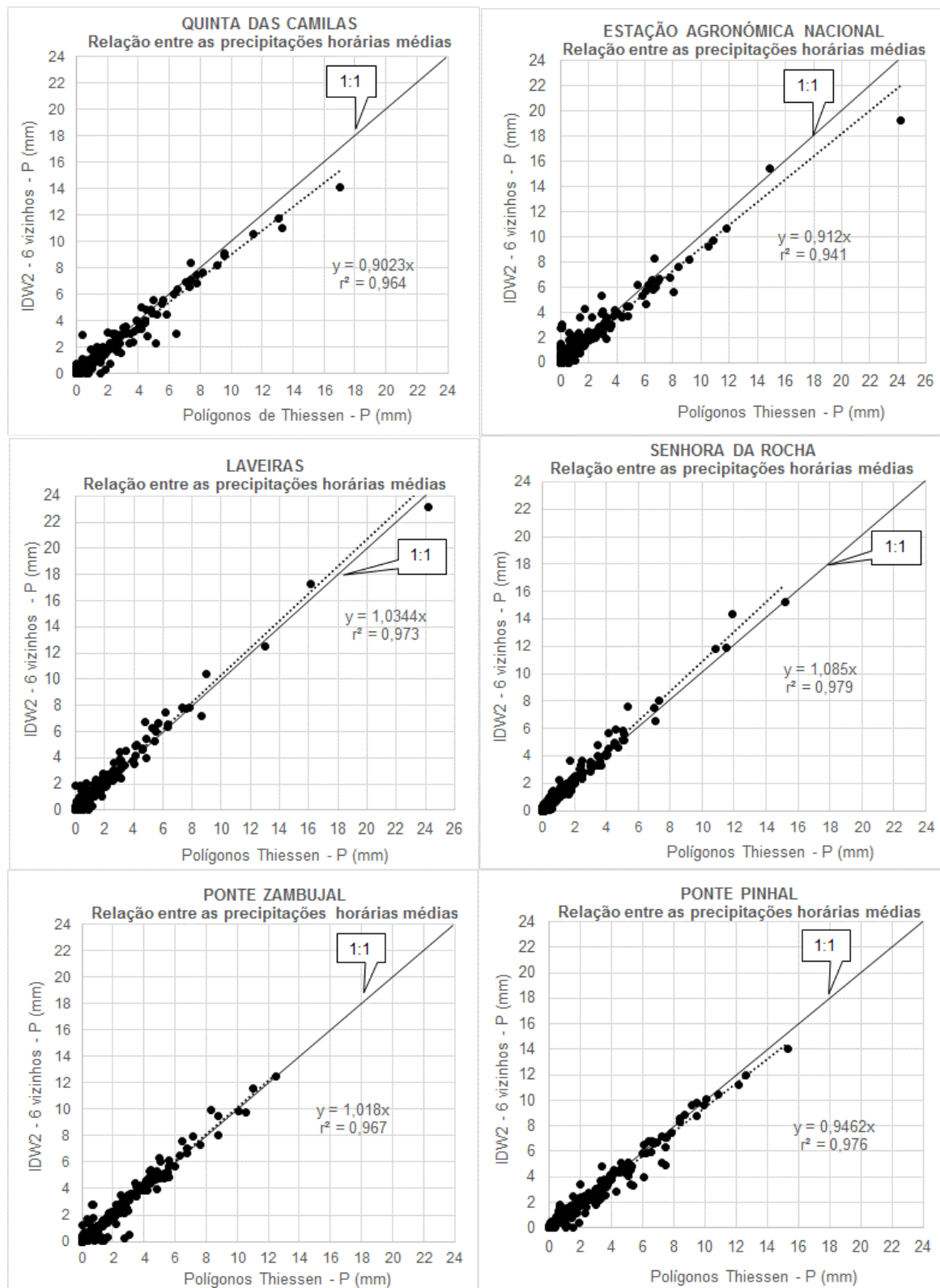


Figura 2.17 – Relação entre as precipitações horárias médias sobre as sete bacias hidrográficas, obtidas recorrendo aos métodos dos Polígonos de Thiessen e de IDW2-6 (continua).

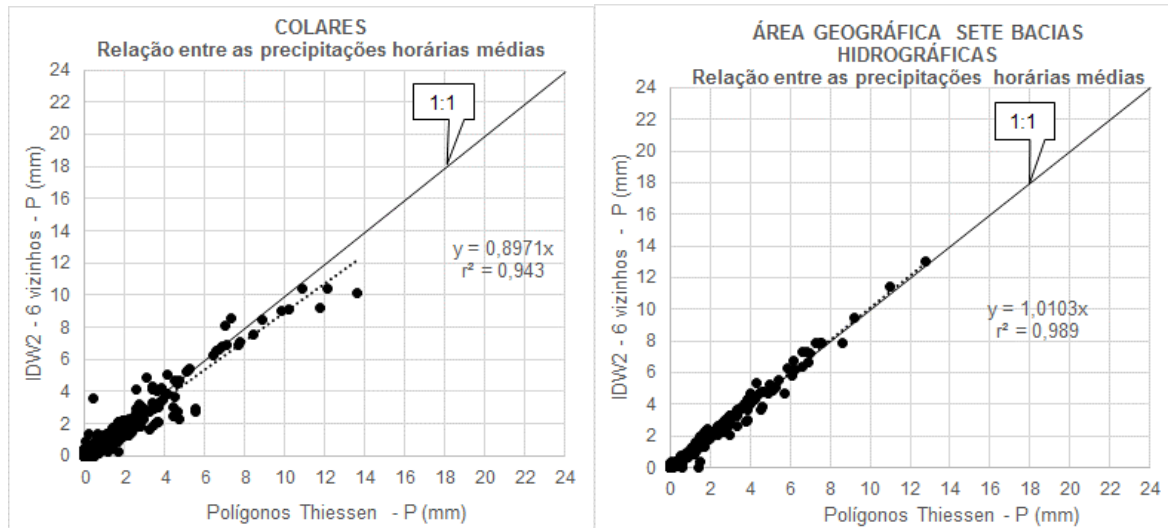


Figura 2.17 – Relação entre as precipitações horárias médias sobre as sete bacias hidrográficas, obtidas recorrendo aos métodos dos Polígonos de Thiessen e de IDW2-6 (continuação).

Considerando os resultados obtido para a caracterização da distribuição espacial da precipitação poder-se-á concluir:

- O método IDW2-6 estima uma precipitação horária ponderada em área nas sete bacias hidrográficas analisadas de cerca de 97 % do estimado pelo método dos Polígonos de Thiessen.
- Considerando que estes métodos se baseiam nas distâncias relativas entre os pontos de observação da precipitação, o que é adequado em zonas geográficas com diferenças de altitude pouco significativas, como é o caso da região em análise, onde as diferenças altimétricas variam entre 488 m (na bacia hidrográfica definida na sessão de Colares) e 253 m (na bacia hidrográfica definida na sessão da Estação Agronómica Nacional).

As distribuições espaciais da precipitação, obtidas pelos dois métodos descritos anteriormente e associados aos eventos chuvosos selecionados para este estudo, serão comparadas com a distribuição espacial da precipitação estimada a partir das precipitações obtidas através das refletividades registadas pelo radar meteorológico em Cruz do Leão (Coruche).

3. CALIBRAÇÃO DO RADAR METEOROLÓGICO SITUADO EM CRUZ DO LEÃO

3.1. Monitorização com o radar meteorológico

3.1.1. História e Conceitos

Em 1904 na Alemanha, Christian Hülsmeyer construiu o primeiro Radar, denominado *telemobiloscope* (comprimento de onda entre 40 e 50 cm), com baixa precisão, de construção difícil e com um sistema que permitia detetar a curto alcance (até 3 km) o objeto (navio), mas sem avaliar a distância até ao mesmo. Em 1934, Pierre David, revendo a teoria eletromagnética, encontrou o estudo realizado pelo alemão e retomou as experiências para desenvolver um sistema eficiente de deteção por ondas de rádio em alta frequência, visando a localização de aviões. Simultaneamente, Henri Gutton e Maurice Ponte, conseguiram criar um dispositivo de deteção que funcionou com grande precisão. Em 1935, foi instalado o primeiro sistema de radiotelemetria no navio Normandie para localizar e prevenir a aproximação de obstáculos. No início da Segunda Guerra Mundial, Robert Watson-Watt, melhorou e desenvolveu novas tecnologias associadas à emissão das ondas curtas de rádio, com o objetivo de detetar aviões em voo (com informação da localização, distância e velocidade) antes de serem vislumbrados no horizonte e, deste modo, melhorar a defesa aérea do Reino Unido e diminuir o número de vítimas na população.

Radar é o acrónimo de **Radio Detection And Ranging**, isto é, deteção e telemetria pelo sinal de rádio (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Radar>). É o instrumento usado para detetar objetos a longa distância, através da maneira como esses objetos propagam ou refletem ondas de rádio, por exemplo, o radar de Doppler e o de WSR-88D (NEXRAD – Next Generation Weather Radar, <http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>).

Existem dois tipos de radares, os de impulso e os de onda contínua. O radar de onda contínua transmite e recebe constantemente ondas eletromagnéticas (sinais de rádio contínuos), sendo por isso necessário separar os sinais emitido e recebido, de potências distintas: a potência do eco (sinal recebido) é mais fraca que o sinal emitido. Para aumentar o isolamento entre o sinal emitido e o recebido, isto é, para que o sinal emitido não interfira na leitura do sinal de retorno, utilizam-se por vezes duas antenas, uma funciona como transmissor e a outra como recetora. O radar de impulso necessita de tempos de escuta e de emissão, sendo configurado tendo em consideração a duração do impulso e o tempo entre a repetição dos mesmos, operação regulada por um equipamento (comutador) e necessitando apenas de uma antena. Este estudo utiliza dados obtidos pelo radar meteorológico de impulso situado em Cruz do Leão (Coruche).

O radar de impulso tipo, cujo esquema está apresentado na Fig. 3.1, é composto por:

- uma antena transcetora, que em alguns radares tem forma de antena parabólica, um único dispositivo que transmite e recebe os impulsos emitidos por si (normalmente, as antenas são giratórias, permitindo analisar uma área, em vez de apontarem sempre para a mesma direção);
- uma linha de transmissão que encaminha as ondas eletromagnéticas para o foco da antena, disparando contra a parábola e propagando-as para o ambiente;
- um transmissor, de alta potência e alta frequência, que fornece à antena impulsos eletromagnéticos modulados, a qual, por sua vez, os redireciona para o alvo;
- um sistema recetor que deteta e amplifica os sinais (ecos) produzidos quando as ondas refletem no alvo;

- o um comutador ou controlador (ou *duplexador*) que possibilita ao radar emitir e receber sinais na mesma antena, pois determina quando está ligado o transmissor ou o recetor;
- o um processador e visualizador das informações recolhidas, e
- o um equipamento que permite operar e controlar o radar.

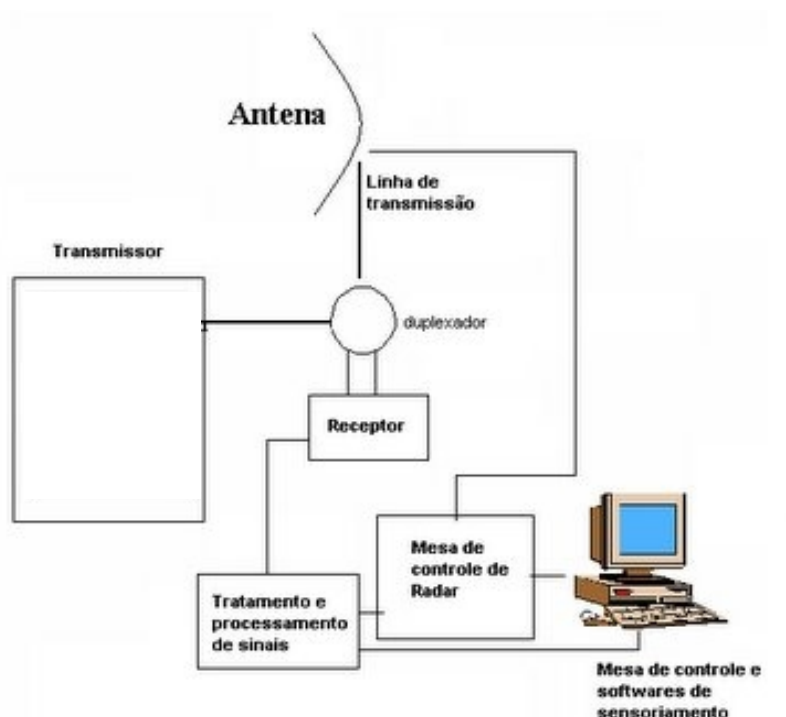


Figura 3.1 - Esquema de um radar de impulso tipo (adaptado de Angeloleithold, 2003, <http://sites.google.com/site/radarpy5aal/>).

Conhecendo a velocidade de propagação do impulso e o tempo de chegada do sinal (eco), pode-se determinar a distância ao objeto (Fig. 3.2), bem como saber se este está a afastar ou a aproximar em relação ao radar, através do Efeito Doppler, desfasamento da frequência entre o sinal emitido e recebido ou refletido (<http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Radar> e <http://pt.wikipedia.org/wiki/Radar>). Isto é, sempre que existe um movimento relativo entre o emissor ou recetor e o objeto, ocorre uma variação de frequência das ondas de emissão da fonte, sendo este desvio de frequência denominado Efeito de Doppler.

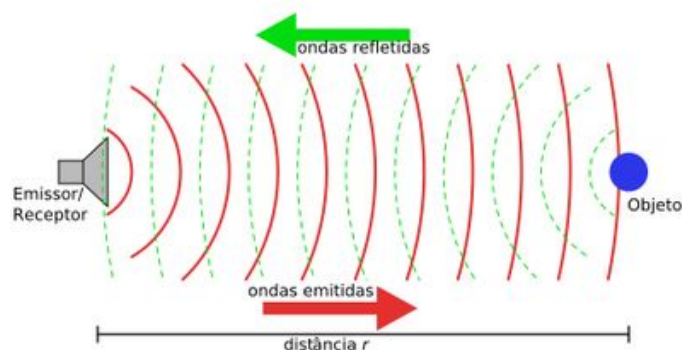


Figura 3.2 – Funcionamento do radar de impulso (<http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Radar>).

O Efeito Doppler foi descrito pelo físico austríaco Johann Christian Andreas Doppler (1842). Em ondas eletromagnéticas este fenómeno foi descoberto de maneira independente pelo francês Hippolyte Fizeau (1848). Por este motivo, o Efeito Doppler também é chamado Efeito Doppler-Fizeau.

As ondas eletromagnéticas refletidas por objetos parados propagam-se em todas as direções de maneira uniforme. Pelo contrário, consoante o objeto se afasta ou se aproxima do observador, o comprimento de onda observado é maior ou menor que o emitido, respetivamente. Sabendo que quando altera o comprimento de onda varia a sua frequência, no caso de o objeto se aproximar do observador a frequência da onda recebida pelo observador é maior que a frequência emitida e se o objeto se afastar a frequência diminui. Este efeito de alteração da frequência e do comprimento de onda provocado por um objeto em movimento em relação à fonte de emissão da onda está esquematizado na Fig. 3.3.

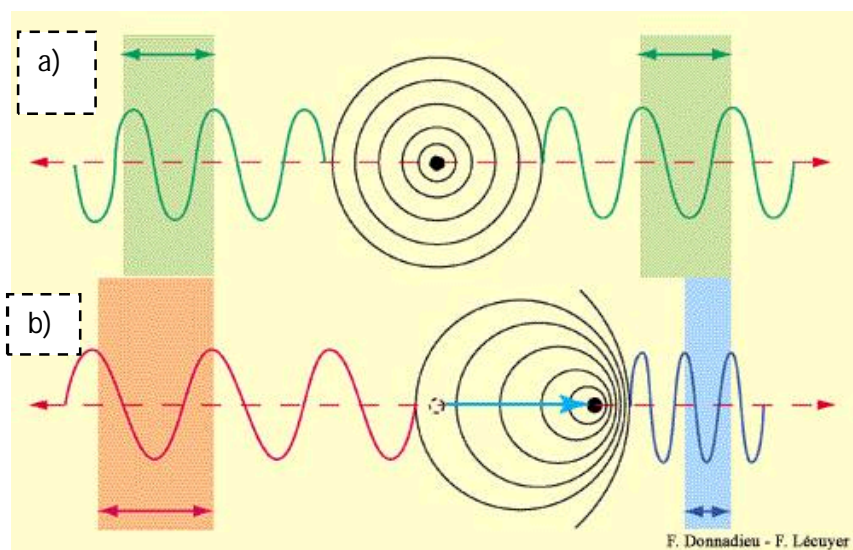


Figura 3.3 – Esquema do Efeito Doppler, que só se manifesta em caso de movimento relativo emissor/recetor e objeto: a) objeto parado em relação a uma fonte (sem Efeito Doppler); b) objeto em movimento de afastamento ou de aproximação em relação a uma fonte (Efeito Doppler). Manutenção do comprimento de onda com objeto estacionário (faixas verde) e alteração do comprimento de onda com objeto em movimento, de afastamento (faixa cor-de-laranja) ou de aproximação (faixa azul) (adaptado de <http://knol.google.com/k/stephane-jourdan/the-doppler-effect-s-contribution-in/3dfvm2oyvur0n/11#>, portal descontinuado a 1 de maio de 2012).

No radar meteorológico são utilizadas ondas eletromagnéticas de alta potência para se alcançar grandes distâncias. Ao passarem por uma nuvem, as ondas eletromagnéticas causam em cada gota uma ressonância na frequência da onda incidente, de modo que cada gota produz ondas eletromagnéticas irradiando em todas as direções. Parte da energia gerada pelo volume total de gotas iluminado pelo feixe de ondas do radar volta à antena, pelo que, sabendo-se o momento em que o feixe de ondas foi emitido pelo radar e quanto tempo depois o sinal retornou, se determina a distância do alvo ao radar. A intensidade do sinal de retorno (eco) está associada ao tamanho e à distribuição das gotas no volume iluminado pelo radar. Sabendo-se qual é a elevação da antena e o azimuth correspondente (ângulo de 0° a 360° , formado entre a direção Norte e a direção considerada, contado a partir do Pólo Norte, no sentido horário), pode-se determinar com precisão a região do espaço onde está a chover. Para uma mesma elevação e azimuth podem ser transmitidos cerca de 200 impulsos de alta energia, sendo a mesma região do espaço amostrada 200 vezes. Em seguida é efetuada uma média do sinal de retorno, processo bastante rápido, visto as ondas eletromagnéticas propagarem-se à velocidade da luz ($300\,000\text{ km s}^{-1}$), sendo a duração de cada impulso determinante para a resolução dos dados do radar (<http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>).

Os radares são utilizados com objetivos muito diversificados, por exemplo: na marinha visando a navegação (detetando e monitorizando obstáculos ou outros navios), na aeronáutica visando o controlo e vigilância do tráfego aéreo, no exército auxiliando o patrulhamento, no trânsito permitindo o controlo da velocidade dos veículos, nas aplicações espaciais (rastream objetos em órbitas ao redor da Terra), na meteorologia visando a monitorização atmosférica (apoio à previsão do estado do tempo), na hidrologia auxiliando a modelação hidrológica e hidráulica (desenvolvimento de modelos de previsão para apoio aos sistemas de preparação, aviso e alerta de inundações), na investigação visando melhorar a sua precisão (e.g., aperfeiçoar o funcionamento e o processamento de informação), agricultura (apoio ao planeamento das atividades agrícolas), entre inúmeras utilizações.

“A grande importância operacional dos sistemas de radar meteorológico, designadamente na deteção e acompanhamento de fenómenos meteorológicos perigosos, na previsão para períodos muito curtos (até seis horas) e na previsão hidrológica, tem merecido reconhecimento internacional crescente” (Costa, 2008). “A OMM (Organização Meteorológica Mundial) tem inclusivamente considerado os equipamentos de radar como um vetor da maior relevância na melhoria do subsistema de superfície do Sistema Global de Observação (GOS) do Programa da Vigilância Meteorológica Mundial, o que tem estimulado em grande medida o desenvolvimento do sector” (Costa, 2008). “O estabelecimento de redes transnacionais de radares tem prosseguido, área em que a Europa constitui um bom exemplo, contando atualmente com cerca de 150 sistemas de radar instalados” (Costa, 2008).

O projeto Europeu OPERA – Radar Network (*Operational Programme for the Exchange of Weather Radar Information*), desenvolvido no âmbito da EUMETNET (*European Meteorological Services Network*), tem como objetivos fornecer uma plataforma europeia para troca de conhecimentos sobre questões do radar meteorológico e para desenvolver, gerar e distribuir produtos provenientes de radares de todas as nações europeias de alta qualidade (2013-2018). Durante o desenvolvimento do projeto OPERA o número de radares envolvidos aumentou de 200 radares meteorológicos em 2013 (tipo banda C são 164; tipo banda S são 33 e tipo banda X são 3) para 226 (tipo banda C são 179, tipo banda S são 31 e tipo banda X são 16) (Fig. 3.4). Neste projeto a superfície de intensidade de precipitação é calculada em cada 15 minutos, que são a base da estimativa da precipitação horária, sendo que as medições abaixo de 200 m de altitude não são utilizadas na estimativa, devido a potenciais condicionantes operacionais do radar meteorológico.

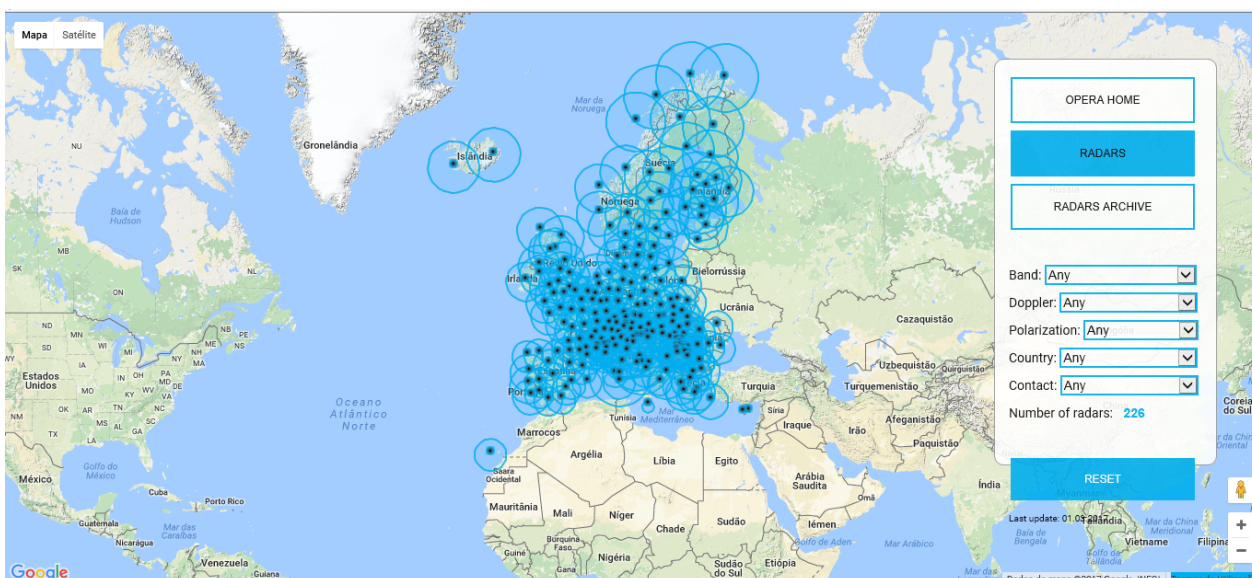


Figura 3.4 – Projeto OPERA, localização dos radares meteorológicos (http://eumetnet.eu/wp-content/themes/aeron-child/observations-programme/current-activities/opera/database/OPERA_Database/index.html).

O projeto Europeu OPERA é às vezes chamado "NEXRAD da Europa". Atualmente, NEXRAD (*Next Generation Weather Radar*) é o sistema composto por 160 radares meteorológicos doppler tipo banda S situados nos EUA e no seu exterior. O sistema NEXRAD é um esforço conjunto entre os departamentos de comércio dos EUA, defesa e transporte. As agências de controlo do sistema são *National Weather Service* (NWS), *Air Force Weather* e *Federal Aviation Administration* (FAA). Em 1988, as agências NEXRAD estabeleceram o centro de operações do WSR - 88D (*Weather Surveillance Radar, 1988, Doppler*), NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) *Radar Operations Center Radar* (ROC), em Norman, Oklahoma. Na Fig. 3.5 apresentam-se as localizações dos atuais radares do NEXRAD. A partir desta rede são disponibilizadas diversos níveis de informação agrupados por dois níveis (*Level II* e *Level III*).

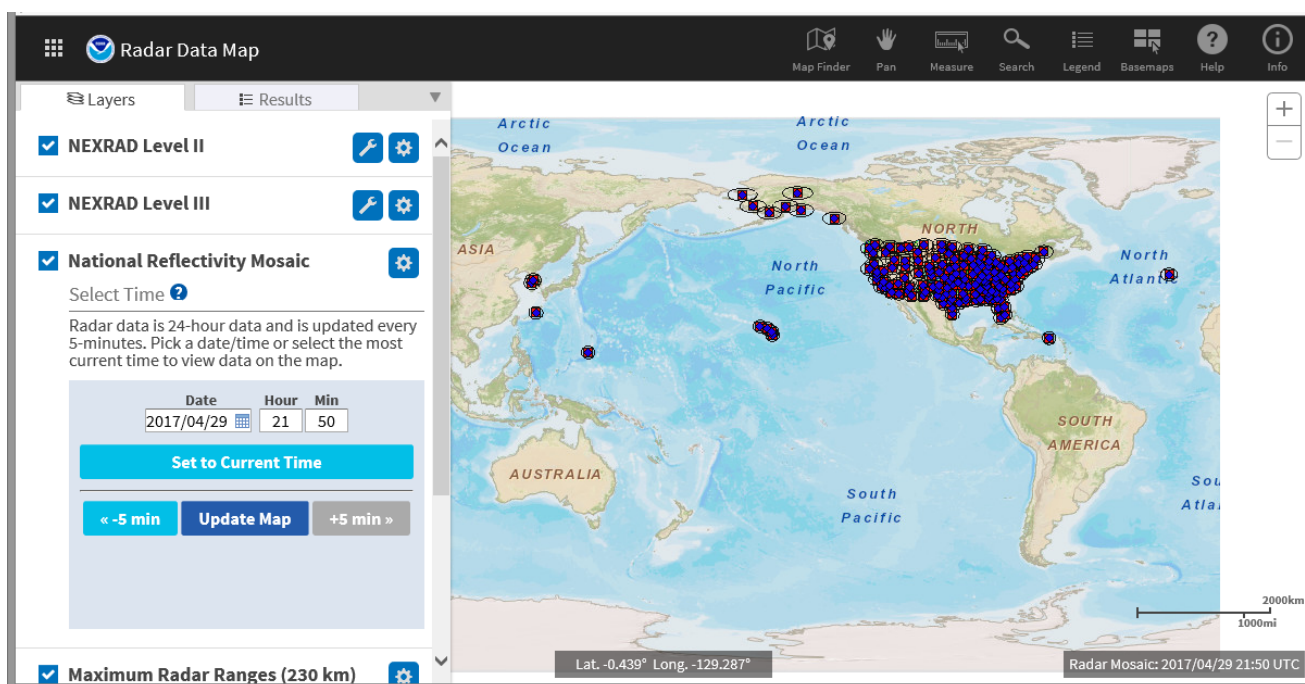


Figura 3.5 – NEXRAD, localização dos radares meteorológicos (<https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/radar/>).

Os radares meteorológicos são equipamentos com capacidade de detetar e localizar remotamente objetos à distância pela emissão de ondas eletromagnéticas na frequência das microondas (Fig. 3.6), e de processar e analisar as ondas refletidas pelos alvos meteorológicos (hidrometeoros) atingidos, gotículas, gotas de chuva, neve ou granizo. Outros alvos não meteorológicos são também atingidos, como poeiras e insetos (<http://www.ipma.pt/pt/educativa/>).

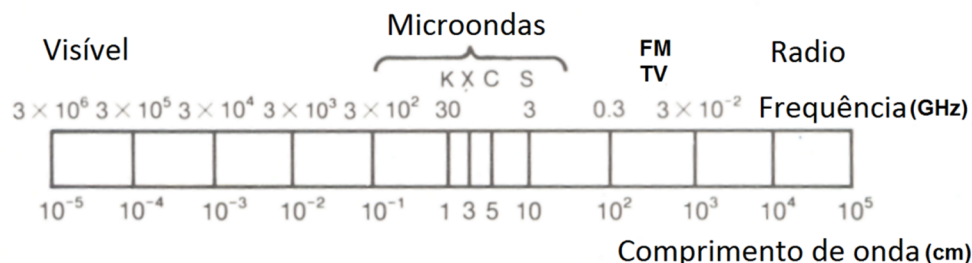


Figura 3.6 - Espectro eletromagnético com identificação da gama utilizada pelo sistema de radar meteorológico - micro-ondas (Collier, 1989).

No sentido dos comprimentos de onda decrescentes, podem-se considerar de interesse para uso em meteorologia as seguintes bandas (<http://www.ipma.pt/pt/educativa/>):

- 1- Banda L: comprimento de onda entre 15 e 30 cm (frequências entre 1 e 2 GHz); esta banda é utilizada para estudos de turbulência em ar limpo.
- 2- Banda S: comprimento de onda entre 8 e 15 cm (frequências entre 2 e 4 GHz); esta banda é muito utilizada nos EUA e em regiões tropicais, tendo a vantagem de detetar gotas de grande dimensão e de os respetivos comprimentos de onda não serem facilmente atenuados pela própria precipitação.
- 3- Banda C: comprimento de onda entre 4 e 8 cm (frequências entre 4 e 8 GHz); esta banda é muito utilizada na Europa, constituindo um bom compromisso entre o custo do equipamento e a capacidade de deteção e medição da precipitação nas regiões de latitudes médias. No entanto, o sinal é mais atenuado pela precipitação do que o correspondente à banda S.
- 4- Banda X: comprimento de onda entre 2,5 e 4 cm (frequências entre 8 e 12 GHz); esta banda é utilizada para a deteção de partículas de menor dimensão, como gotículas de precipitação, sendo por este facto muito utilizada para estudos, por exemplo, sobre a formação e desenvolvimento de nuvens e deteção de neve. Uma vez que o sinal desta gama de comprimento de onda é muito atenuado pela precipitação, é apenas utilizada para alcances muito reduzidos.
- 5- Banda K: compreende duas sub-bandas, uma entre 1,7 e 2,5 cm (frequências entre 12 e 18 GHz) e outra entre 0,75 e 1,2 cm (frequências entre 27 e 40 GHz). Oferece maior sensibilidade do que a banda X e um alcance prático ainda mais reduzido.

Os modernos sistemas de radar meteorológico, para além de medirem a amplitude (ou intensidade) dos sinais retro difundidos, medem a sua variação de frequência face ao emitido, pelo facto de o alvo se encontrar em movimento em relação ao radar entre dois impulsos sucessivos (Efeito Doppler). O Efeito Doppler é de ordem de grandeza muito inferior ao valor da frequência, logo maior comprimento de onda, em que opera um sistema da banda C (<http://www.ipma.pt/pt/educativa/>). Por exemplo, para um comprimento de onda de 5,5 cm e uma velocidade Doppler de 10 m s^{-1} , o efeito Doppler é de 364 Hz, sendo 6 ordens de grandeza inferior ao da frequência de trabalho, da ordem dos GHz (<http://www.ipma.pt/pt/educativa/>).

Atualmente, os sistemas de radar meteorológico em operação são, na sua maioria, de polarização horizontal. Ou seja, a radiação eletromagnética emitida pela antena apresenta o respetivo campo elétrico a oscilar no plano horizontal. Este facto permite ao sistema emitir impulsos com polarização horizontal e receber a refletividade associada a impulsos com este tipo de polarização e medem, apenas, a dimensão horizontal das partículas observadas (<http://www.ipma.pt/pt/educativa/>). A tecnologia de dupla polarização, que está progressivamente a ser instalada nos sistemas de radar meteorológico, está associada à emissão de polarização horizontal e vertical e à respetiva receção. Em geral, é alternadamente emitido um impulso em cada tipo de polarização. A polarização dupla mede a dimensão horizontal e vertical das partículas (<http://www.ipma.pt/pt/educativa/>). Na Fig. 3.7 representa-se a polarização horizontal e vertical que poderá ser realizada pelos radares.

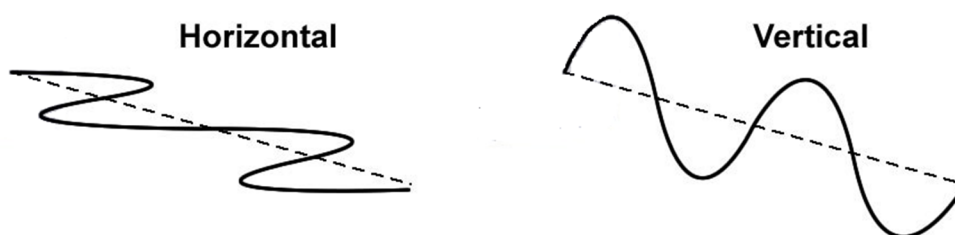


Figura 3.7 – Polarização horizontal e vertical.

O radar meteorológico fornece informação sobre a refletividade, a base geralmente utilizada para estimar a precipitação, e quando mede o Efeito Doppler permite monitorizar o vento. A refletividade é a razão entre a intensidade da radiação total refletida e a radiação total incidente.

A refletividade possui uma relação física com o espectro de gotas observado, podendo determinar-se a partir deste espectro uma relação entre a refletividade do radar (Z) e a intensidade de precipitação (R). Esta relação é conhecida como relação Z - R . Para a maioria dos radares meteorológicos, o limite inferior detetável da intensidade de precipitação é de 1 mm h^{-1} , a uma distância de 190 km (<http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>).

O mínimo de intensidade de precipitação estimada resulta da refletividade (Z) mínima detetável, isto é, o mínimo valor de refletividade que retorna de cada distância ao radar, que por sua vez depende do valor mínimo de potência refletida pelo alvo detetável pelo radar meteorológico e das características do equipamento (parâmetros do radar e fatores dielétricos e numéricos). Calheiros (1984) comparou a intensidade de precipitação mínima detetável em três radares meteorológicos (São Paulo, São Carlos e Ibatinga, localizados no Brasil), considerando uma distância entre o radar e o alvo de 113 km, e quatro valores para o sinal mínimo detetável. Estimou que para um nível de sinal mínimo detetável de -104 dBm (grandeza típica para os radares em questão, que corresponde a uma unidade logarítmica de potência, Fig. 3.8) o valor mínimo detetado variou entre $6,5 \text{ mm h}^{-1}$ (São Paulo) e $1,9 \text{ mm h}^{-1}$ (Ibatinga), podendo aumentar para 19 mm h^{-1} , quando o sinal mínimo passou para -90 dBm.

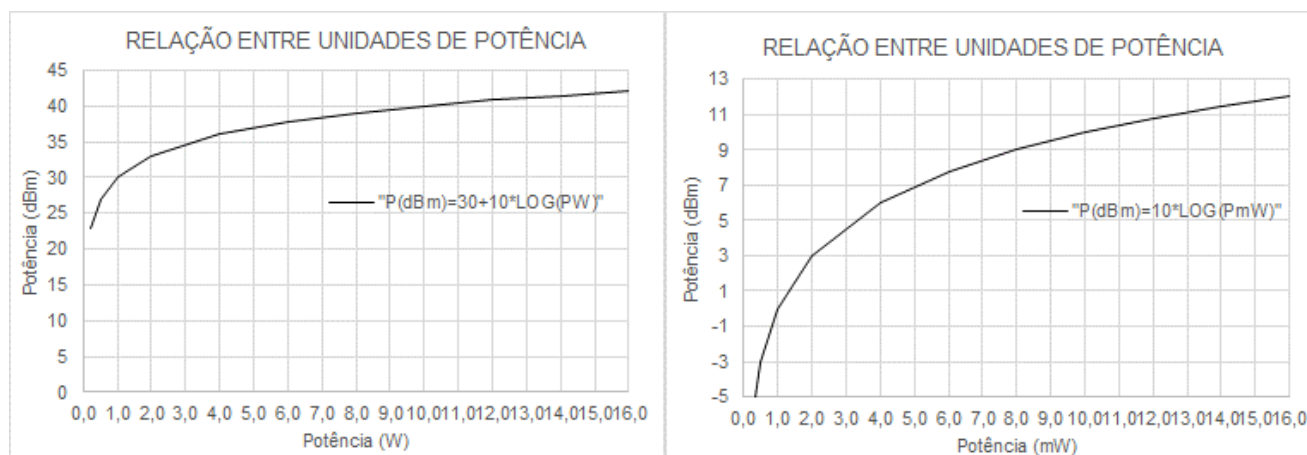


Figura 3.8 – Relação entre unidades de potência (dBm, mW, W).

Uma característica importante dos radares meteorológicos modernos é o seu programa informático para tratamento do grande volume de dados de refletividade gerados. Esse programa permite obter em tempo real dois tipos de mapas de intensidade de precipitação (Fig. 3.9):

- PPI (*Plan Position Indicator*)** – os dados de intensidade de precipitação na área do radar (superfície cônica gerada pela revolução de 360° da antena) correspondem à refletividade medida numa dada elevação e até ao alcance configurado, projetada num plano horizontal. O radar mantém constante o seu ângulo de elevação, alterando o ângulo de azimute.
- CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*)** - os dados de intensidade de precipitação na área do radar correspondem às refletividades medidas interpoladas numa altitude constante, sendo estas obtidas através de segmentos de diversas elevações mais próximas da altitude de interpolação. O radar não mantém constante o seu ângulo de elevação, alterando o ângulo de azimute.

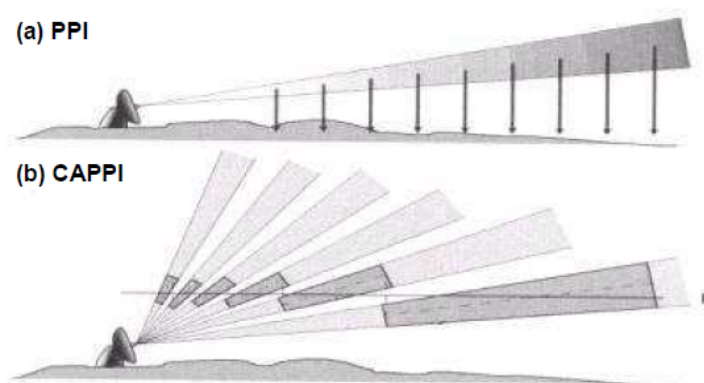


Figura 3.9 – Duas formas de operação do radar (Santos da Silva, 2006, cit. por Farias, 2009).

Os CAPPIs resultam da interpolação de dados a uma altitude constante, que pode variar entre 1,5 a 18,0 km, numa área de $360 \times 360 \text{ km}^2$, com uma resolução de, por exemplo, $2 \times 2 \text{ km}^2$. Esta resolução espacial equivale a ter 32 400 estações udográficas numa área aproximada de $152\,000 \text{ km}^2$ (<http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>). A partir de dois CAPPIs distintos, separados por um intervalo de tempo variável, entre 20 e 50 minutos, determina-se a velocidade do sistema meteorológico, descrito por cartas sinópticas, através da correlação espacial das intensidades de precipitação observadas (<http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>).

A qualidade dos dados do radar meteorológico tem de ser verificada constantemente, pois o equipamento é sensível e pode descalibrar, pelo que é importante manter em atividade na zona udográficos com teletransmissão, para aferição da relação Z-R (<http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>).

Considerando os objetivos meteorológicos, a potência média recebida pelo radar, resultante da média da potência de impulsos sucessivos (resultante do número de vezes que uma determinada região é amostrada), traduz-se pela denominada Equação do Radar (Collier, 1989), definida por:

$$\overline{P_r} = \frac{P_t G^2 \theta \varphi h_t L_t \pi^3}{1024 \ln 2 r_d^2 \lambda^2} |K_r|^2 Z \quad (3.1)$$

sendo:

$\overline{P_r}$, a potência média recebida pelo radar (W);

P_t , a potência máxima de transmissão do radar (W), valor conhecido do radar;

θ , a abertura do feixe na horizontal (rad), valor conhecido do radar;

φ , a abertura do feixe na vertical (rad), valor conhecido do radar;

h_t , o comprimento do impulso de duração t (m), valor conhecido do radar;

L_t , o somatório de todas as perdas (dB km⁻¹), isto é, atenuações pelos gases da atmosfera, pela precipitação, pela radome, que por vezes cobre o radar, e pelas limitações da deteção do recetor);

π , a constante circular (3,141593);

r_d , a distância a que se encontram as partículas (hidrometeoro) (km);

λ , o comprimento de onda da radiação do radar (cm), valor conhecido do radar;

G , o ganho real da antena do radar em relação a uma antena isotrópica (antena virtual ou teórica, pois é aquela que irradia igualmente em todas as direções), valor conhecido do radar que corresponde ao aumento da quantidade de energia produzida pela focagem da antena (adimensional), dado pela Eq. (3.2);

K_r , o índice de refração da partícula, expresso pela Eq. (3.3);

Z , o fator de refletividade (cm⁶ x cm⁻³), dado pela Eq. (3.4).

O ganho teórico da antena parabólica do radar não inclui o rendimento do equipamento, o qual é considerado na estimativa do ganho real G :

$$G = \eta \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (3.2)$$

em que A_e é a abertura efetiva da antena (cm²) e η é o rendimento (-).

O índice de refração da partícula K_r é expresso por:

$$K_r = (m_r^2 - 1)/(m_r^2 + 2) \quad (3.3)$$

onde m_r é o índice de refração complexo (do hidrometeoro). $|K_r|^2$ depende do comprimento de onda do radar meteorológico e da temperatura, por exemplo, para a água e para um comprimento de onda entre 10 e 3,2 cm é de cerca de 0,93; sendo para o gelo, independentemente do comprimento de onda, de 0,197 (Battan, 1973, WMO, 2010).

O fator de refletividade ou a refletividade Z é expresso por:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{np} D_i^6}{\Delta v} \quad (3.4)$$

em que D_i representa o diâmetro do hidrometeoro ou partícula i (cm), n_p o número de partículas e Δv o volume amostrado pelo impulso (cm^3).

Definindo a constante do radar C_r , que agrega os coeficientes e constantes associados ao radar, pode dar-se à equação do radar anterior a forma simplificada:

$$\bar{P}_r = \frac{C_r |K_r|^2 Z}{r_d^2} \quad (3.5)$$

Esta equação do radar foi deduzida admitindo as seguintes hipóteses (Collier, 1989):

- a) As partículas difusoras da precipitação são esferas homogêneas cujos diâmetros são pequenos em comparação com o comprimento de onda ($D_i < 3,2$ mm) (para ser válida a aproximação de dispersão ou espalhamento de Rayleigh).
- b) O volume iluminado (amostrado) está completamente preenchido por partículas da precipitação distribuídas aleatoriamente.
- c) O fator de refletividade, Z , é uniforme ao longo de todo o volume amostrado e constante durante o intervalo de amostragem ($\text{cm}^6 \times \text{cm}^{-3}$).
- d) As partículas são todas gotas de água ou todas partículas de gelo, ou seja, $|K_r|^2$, que só depende do estado físico da água, é o mesmo para todas as partículas.
- e) As difusões múltiplas são desprezáveis.
- f) As ondas emitidas e retro-difundidas são linearmente polarizadas.
- g) O feixe principal do diagrama de radiação da antena tem uma forma gaussiana ou aproximada.
- h) A contribuição dos lóbulos laterais para a potência recebida é desprezável.
- i) A antena é parabólica com secção transversal circular e o seu ganho é conhecido.
- j) A absorção do sinal resultante do terreno (ecos) é desprezável.
- k) Todas as perdas de potência do sistema são consideradas.
- l) O valor da potência medido, \bar{P}_r , é obtido a partir da média correspondente a um número suficiente de impulsos ou amostras independentes para que seja considerado representativo do volume iluminado.

Dispersão de Rayleigh (em homenagem a Lord Rayleigh) é a dispersão da luz ou qualquer outra radiação eletromagnética por partículas muito menores que o comprimento de onda dos fótons dispersos (partícula elementar da força eletromagnética). Ocorre quando a luz atravessa sólidos e líquidos transparentes, mas observa-se com maior frequência nos gases. A dispersão de Rayleigh da luz solar na atmosfera é a principal razão pela qual o céu é azul. Se o tamanho das partículas for maior que o comprimento de onda, a luz não se decompõe nas suas componentes cromáticas e todos os comprimentos de onda são igualmente dispersos, motivo pelo qual, ao atravessar uma nuvem, esta se vê como branca. Assim, para que a luz seja dispersada, o tamanho das partículas deve ser similar ou menor que o comprimento de onda. O grau de dispersão de Rayleigh que sofre um raio de luz depende do tamanho das partículas e do comprimento de onda da luz, a intensidade da luz dispersada depende inversamente da quarta potência do comprimento de onda, relação conhecida como Lei de Rayleigh-Jeans.

Se não houver qualquer desvio nos parâmetros do radar, C_r tem sempre o mesmo valor, pelo que $\overline{P_r}$ depende apenas das características das partículas observadas (hidrometeoros), ou seja, de $|K_r|^2$ e Z , e da distância a que se encontram estes alvos meteorológicos e, assim, a intensidade do sinal recebido (eco) é tanto mais fraco quanto mais distante estiver a precipitação. Recorrendo à equação do radar, esta pode resolver-se em ordem ao fator de refletividade Z , uma vez que os restantes parâmetros são conhecidos.

A estimativa da precipitação, através das medições do radar, é, normalmente, obtida a partir da relação entre a refletividade e a intensidade de precipitação (relação $Z - R$), em detrimento da estimativa obtida pela atenuação da radiação, emitida pelo radar, provocada pelos hidrometeoros (gotas de chuva, neve, nevoeiro ou granizo). O fator da refletividade da precipitação ou do radar Z definido pela Eq. (3.4), mas expresso por $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$, poderá ser relacionado com a intensidade da precipitação ou da queda de neve R (mm h^{-1}) através da expressão (Collier, 1989):

$$Z = aR^b \quad (3.6)$$

em que a e b são constantes determinadas empiricamente e que dependem do tipo de precipitação observada (orográfica, convectiva ou frontal). Muitos valores já foram propostos para a e b , sendo os mais utilizados 200 e 1,6, respetivamente (Marshall e Palmer, 1948, cit. por Collier, 1989). Por conveniência, tanto o fator de refletividade radar, Z , como a intensidade da precipitação, R , podem-se exprimir em decibel, nas unidades dBZ e dBR, respetivamente, isto porque a gama de valores da refletividade radar expressa em $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ é enorme se comparada com a gama de valores da intensidade de precipitação, como é possível constatar com a aplicação da relação $Z - R$ de Marshall e Palmer (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 - Relação de valores de Z expressos em duas unidades e sua correspondência com os valores de R (valores aproximados) (adaptado de Miranda, 2013).

$Z (mm^6 m^{-3})$	$Z(dBZ)$	$R (mm h^{-1})$
1,6	2,04	0,05
5	6,99	0,1
200	23,01	1
608	27,84	2
1841	32,65	4
7962	39,01	10
24140	43,83	20
179150	52,53	70
316979	55,01	100

Assim, o fator de refletividade da precipitação ou do radar, $Z (mm^6 m^{-3})$, e a intensidade de precipitação, $R (mm h^{-1})$, poderão ser expressas em dBZ (decibéis de Z) e dBR (decibéis de R), através das Eqs. (3.7) e (3.8), respetivamente:

$$dBZ = 10 \log_{10} \left(\frac{Z \text{ mm}^6 m^{-3}}{1 \text{ mm}^6 m^{-3}} \right) \quad (3.7)$$

$$dBR = 10 \log_{10}(R) \quad (3.8)$$

Com esta alteração de unidades a relação Marshall e Palmer (1948) passa a ser expressa pela Eq. (3.9):

$$dBZ = 10 \log_{10} 200 + 16 \log_{10} R \quad (3.9)$$

No subcapítulo 3.4. apresenta-se um quadro resumo dos valores indicados na literatura científica, que confirma a ausência de uma relação universal entre estes parâmetros, embora as experiências demonstrem que elevadas intensidades de precipitação produzem ecos mais intensos.

No caso de existir um radar meteorológico apetrechado com dupla polarização poder-se-á medir a refletividade diferencial, Z_{DR} (dB), traduzida por um fator que combina a refletividade nas polarizações horizontal (Z_H) e vertical (Z_V), ambas expressas por dBZ, que permite estimar a distribuição do tamanho das gotas de água e, por sua vez, avaliar a intensidade de precipitação. Segundo Seliga e Bringi (1976, cit. por Collier, 1989), este diferencial é determinado através de:

$$Z_{DR} = 10 \log \left(\frac{Z_H}{Z_V} \right) \quad (3.10)$$

Seliga e Bringi (1976, cit. por Collier, 1989), provaram que o diferencial da refletividade é aproximadamente uma função linear da distribuição do tamanho mediano do diâmetro do hidrometeoro (D_0), num dado volume.

A distribuição do tamanho do diâmetro dos hidrometeoros (gotas de água), DSD (raindrop size distribution), é obtida pelas medições dos disdrómetros, ou por equipamento que recolhe as gotas de água ou por radares de

dupla polarização. As medições de Marshall e Palmer (1948) indicaram que o tamanho das gotas de água, nas precipitações estratiformes, seguia uma distribuição exponencial, $N(D)$, expressa por:

$$N(D) = N_0 \exp(-\Delta D_i) \quad (3.11)$$

Sendo Δ o coeficiente angular (mm^{-1}), N_0 o coeficiente de interceção ou linear ($\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$), com o valor de $8 \times 10^3 \text{ m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ (considerando uma precipitação associada a sistemas estratiformes), $N(D)$ o número de hidrometeoros por unidade de volume de ar (dD), num intervalo de milímetro ($\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$), com diâmetro compreendido entre D_i e $D_i + dD_i$, e $D_0 = 3,67/\Delta$ (Atlas, 1964, Geotis, 1968, cit. por Collier, 1989). Sabendo que a refletividade do radar (Z) é proporcional à distribuição do tamanho das gotas de água, expressa pela Eq. (3.4), e conhecendo a DSD, Eq. (3.11), a refletividade poderá ser obtida por:

$$Z = \int_0^\infty N(D) D_i^6 dD_i = \int_0^\infty N_0 \exp(-\Delta D_i) D_i^6 dD_i \quad (3.12)$$

A resolução da equação anterior permitiu determinar a relação entre o coeficiente angular e a intensidade de precipitação (mm h^{-1}):

$$\Delta = 4,1 R^{-0,21} \quad (3.13a)$$

$$\Delta = 2,29 R^{-0,45} \quad (3.13b)$$

O coeficiente angular depende da intensidade da precipitação, sendo a Eq. (3.13a) utilizada quando ocorre precipitação (Gunn e Marshall (1958, cit. por Battan, 1973) e a Eq. (3.13b) aplicada quando ocorre neve (1970, cit. por Battan, 1973).

Seliga *et al.* (1981, cit. por Collier, 1989), concluíram que, nos sistemas convectivos, os resultados do ajustamento entre a intensidade de precipitação observada e a refletividade diferencial e entre a intensidade da precipitação observada e a refletividade diferem, respetivamente, em cerca de 22 % e 42 % da intensidade da precipitação observada nas estações udoográficas. Excelentes ajustamentos foram obtidos entre o diferencial da refletividade e os valores registados nos disdrómetros (Joss e Waldvogel, 1967, Goddard, 1982, cit. por Collier, 1989).

A refletividade diferencial parece conduzir a uma maior precisão na medição da intensidade de precipitação, sem necessidade de se efetuar qualquer ajustamento de calibração aos registos udoográficos. No entanto, conforme é citado em Collier (1989), uma medição pontual de Z_{DR} poderá conduzir a diferentes intensidades de precipitação (Jameson, 1981, cit. Collier, 1989) e a utilização desta técnica necessita de, para além das duas variáveis do radar (Z_{DR} e Z_H), de dois parâmetros adicionais (tamanho máximo e forma da gota) e outros relacionados com o radar, existindo pouco ganho na quantidade de informação a recolher (Atlas, 1982, cit. Collier, 1989). Mais ainda, é necessário efetuar ajustamentos para situações meteorológicas específicas e, à semelhança de outras técnicas, esta é afetada pela presença de gradientes de refletividade abaixo do feixe de radar, que podem ser significativos em caso de trovoadas ou precipitações orográficas. Portanto, a aplicação

do diferencial da refletividade poderia começar a ter os mesmos tipos de problemas que a aplicação da simples refletividade.

Esta abordagem não será implementada neste estudo uma vez que o radar meteorológico utilizado tem apenas polarização horizontal (ou linear) não permitindo medir o diferencial da refletividade.

Na Fig. 3.10 apresenta-se um esquema de um radar meteorológico de impulso com indicação e representação de algumas das suas características de instalação e de funcionamento.

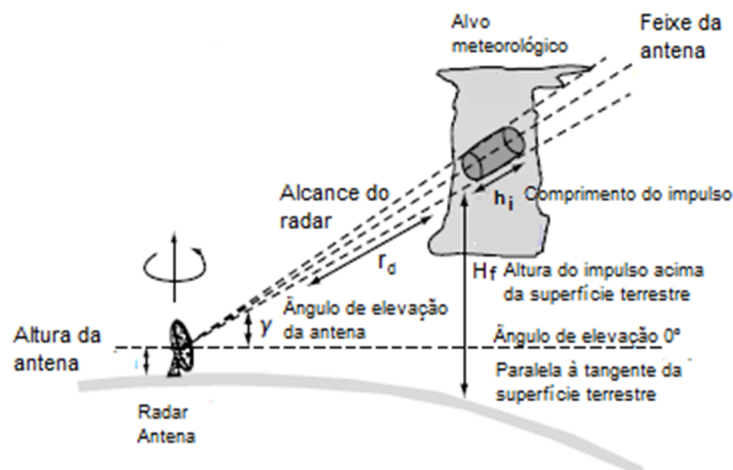


Figura 3.10 – Esquema de funcionamento de um radar meteorológico de impulso (adaptado de WMO, 2010).

Apesar da relação ser simples, existem diversos problemas ou condicionantes associados às características do radar e aos vários tipos de precipitação que afetam o valor do fator de refletividade do radar (designado, também, por fator de refletividade da precipitação ou, simplesmente, refletividade).

Entre os condicionantes do radar meteorológico (operacionais e tecnológicos) estão:

- *Contaminação terrestre (Ground clutter)*, que ocorre quando o lóbulo principal do radar bem como os seus lóbulos secundários (laterais) intercetam obstáculos terrestres (e.g. árvores, animais, insetos, pássaros, superfície terrestre, lagos ou albufeiras), conduzindo à receção de sinais indesejáveis fortes e persistentes, que podem ser erradamente interpretados como existência de precipitação, que são por vezes designados por contaminantes (Fig. 3.11). Quanto menores forem os lóbulos laterais melhores serão as medições.

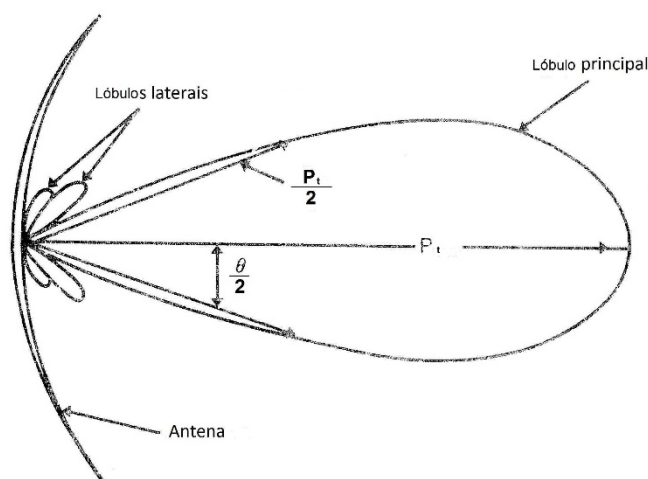


Figura 3.11 – Corte de um feixe de radar de uma antena parabólica, com representação de lóbulos laterais e principal (adaptado de Collier, 1989).

A escolha de um bom local para instalar o radar meteorológico permite ultrapassar a contaminação dos sinais da precipitação pela superfície terrestre, que causaria grandes erros na estimativa da precipitação.

- Ocultação terrestre ou bloqueio do feixe, que ocorre quando, durante o rastreo do radar, a totalidade ou uma parte do feixe principal do radar interceta a superfície terrestre produzindo sinais permanentes (Fig. 3.12).

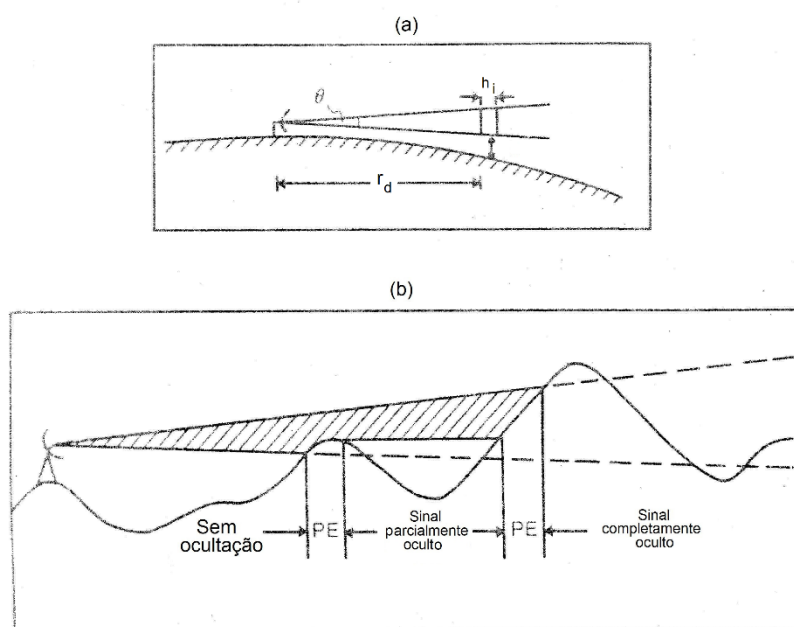


Figura 3.12 – (a) Geometria de um volume de impulso do radar (feixe). (b) Ilustração da ocorrência de rastreo e um sinal (eco) permanente (PE), parcialmente ou totalmente oculto, numa região montanhosa (adaptado de Collier, 1989).

Esta ocultação do feixe pela topografia ocorrida entre o radar e o alvo meteorológico provoca a subestimação da refletividade, logo da intensidade de precipitação.

- Atenuação provocada pelos gases e pela precipitação que depende do comprimento de onda de funcionamento do radar, sabendo que os longos comprimentos de onda (iguais ou superiores a 10 cm) eliminam, geralmente, os erros causados pela atenuação devido à precipitação, isto é, as bandas L e S são as melhores em termos de precisão, mas o seu elevado custo conduz à utilização dos radares meteorológicos de banda C, que corresponde a um equilíbrio entre o custos e a precisão necessária para os objetivos definidos. Uma atenuação do sinal recebido significa uma subestimação da refletividade e da intensidade de precipitação, sendo que esta é também função da distância do radar ao alvo meteorológico e da temperatura (Quadro 3.2). A atenuação é tanto maior quanto menor for a temperatura, considerando hidrometeoros líquidos, e a atenuação aumenta com a distância aos hidrometeoros. Os gases, nomeadamente o vapor de água e as moléculas de água, também atenuam as microondas (3 - 10 cm), podendo atingir 4 dB para pequenos comprimentos de onda, até uma distância de 200 km (WMO, 2010).

Quadro 3.2 – Atenuação da intensidade de precipitação, R (mm h^{-1}), em função do comprimento de onda de funcionamento do radar meteorológico e da sua distância ao alvo meteorológico (World Meteorological Organization- WMO, 2010 e Gunn e East, 1954, cit. por Collier, 1989).

Comprimento de onda (cm)	Atenuação unidirecional (dB km^{-1}) ($T=18^{\circ}\text{C}$)	Atenuação bidirecional (dB km^{-1}) ($T=-^{\circ}\text{C}$)
10	$0,000343 R^{0,97}$	0,0006
5*	$0,0018 R^{1,05}$	$0,0044 R^{0,17}$
3,2	$0,01 R^{1,21}$	$0,0148 R^{0,31}$

Legenda: * - na atenuação bidirecional corresponde a um comprimento de onda de 5,7 cm.

- Atenuação da radome, isto é, da estrutura resistente de proteção do radar (resguarda as superfícies da antena do clima e esconde os equipamentos eletrónicos da antena da vista do público), que é construída por material que pode atenuar o sinal eletromagnético transmitido ou recebido pela antena (é transparente para ondas de radar ou rádio). Esta estrutura poderá atenuar ligeiramente o feixe do radar devido à aderência da humidade à estrutura, sendo a grandeza desta atenuação dependente da natureza da superfície e da dimensão da radome.
- Calibração regular e estabilização do *hardware* do radar, isto é, os radares meteorológicos deverão manter uma potência emissora constante, após um período inicial de aquecimento. Esta estabilidade permite diminuir o erro associado à estimativa da precipitação. A estabilidade deste sistema está associada a diversos aspetos relacionados com o seu funcionamento, como sejam:
 - a) Os sistemas elétricos estão sujeitos a pequenas variações de funcionamento, podendo ser controlados por um sistema de vigilância que mantém as variações elétricas inferiores a 1 dB (estabilidade elétrica), ou ativar um alarme quando uma falha é detetada, diminuindo ou evitando o possível erro.
 - b) A interferência eletromagnética de outros radares ou dispositivos que operem nas microondas, sendo que esta interferência poderá ser ultrapassada, por exemplo, usando filtros no recetor ou mediante desenvolvimento específico do programa informático.

No âmbito da calibração é fundamental que o processamento do sinal otimize as capacidades de recolha do sistema, de forma a minimizar a variância na estimativa da refletividade, mantendo a largura do espectro, e assim reduzir o possível erro.

- Seleção adequada de um local para instalação do radar meteorológico, isto é, a escolha do local influencia a qualidade das medições e, em geral, para obter boas estimativas da superfície de precipitação é necessário utilizar um ângulo da antena do radar com o horizonte inferior a 5° (Collier, 1989). Segundo a WMO (2010) a antena deverá ter um ângulo de elevação na ordem de $0,2^\circ$ e os erros poderão ser também produzidos pela excessiva largura dos feixes ou devido à presença de lóbulos laterais, quando existem ecos de precipitação intensa ou contaminação terrestre.

Entre os condicionantes do tipo de precipitação estão:

- Variabilidade do sinal da precipitação (média da amostra): a dispersão das microondas refletidas pelas partículas de precipitação produz a flutuação na potência do sinal rececionado pelo radar. Para estimar a intensidade de precipitação é necessário calcular a média da potência recebida, através da medição da potência de diversas amostras independentes, resultante de diversos impulsos efetuados sobre áreas adjacentes ou resultante de diversos impulsos num determinado intervalo de tempo (90% da média de 50 amostragens da intensidade do sinal assegura a obtenção de um valor representativo da intensidade rececionada - Marshall e Hitschfeld, 1953, cit. por Collier, 1989).
- Variabilidade da dimensão da gota de água: a relação entre R e Z (Eq. 3.5) depende da natureza da distribuição do tamanho das gotas de água, flocos de neve e granizo. Assim, pode haver muitos valores de a e b associadas a esta equação, dependentes do tipo de precipitação interceptada pelo feixe do radar, uma vez que diferenças na distribuição do tamanho da gota de água (DSD) produzem diferentes intensidades de precipitação para os mesmos valores de refletividade. As equações do tipo Eq. (3.11) pressupõem que o tamanho das gotas de precipitação aumenta de forma exponencial com a refletividade (Marshall e Palmer, 1948, Atlas, 1953, Gunn e Marshall, 1958, cit. por Collier, 1989), o mesmo acontecendo com o tamanho dos flocos de neve e de granizo (Gunn e Marshall 1958, Beckwith 1960, Sekhon e Srivastava, 1970, cit. por Collier, 1989). Portanto, uma precipitação de origem convectiva ou estratiforme poderão estar associadas à mesma refletividade, mas a diferentes D_0 , conduzindo a diferentes intensidades de precipitação.
- Variabilidade da refletividade na vertical (não uniformidade da distribuição vertical de precipitação): devido à inclinação do feixe, ao aumento progressivo da sua largura e à curvatura da superfície terrestre, quanto mais longe o feixe de radar estiver do local de emissão mais acima está e mais afastado está da superfície terrestre. Nestas condições, o radar estima valores médios de precipitação que estão dependentes do desenvolvimento vertical da precipitação (ou perfil da refletividade), podendo este fator introduzir erros significativos nesta estimativa. Desde que exista uma grande variabilidade no perfil vertical de refletividade causada por alterações de fase (incremento da evaporação da precipitação ou fusão de gelo), a refletividade manifesta-se pela produção de uma faixa ou banda brilhante com elevado retorno de energia (*bright band*), registando-se grandes diferenças entre a medição da precipitação através do radar e a observada à superfície terrestre. Esta *bright band* está situada à altitude onde ocorre o derretimento da neve ou dos cristais de gelo, que transmitem uma alta refletividade.

- Ocorrência de processos meteorológicos que induzem erros: as variações na distribuição de tamanho da gota de precipitação, o aumento do sinal pela presença de granizo, a diminuição da refletividade associada a precipitação forte em células convectivas, o aumento do sinal pela neve derretida, o pequeno crescimento das gotas de água na nuvem do nevoeiro e a mistura de ar seco com a massa nebulosa das suas vizinhanças, em altitude, conduz a forte evaporação e sublimação dos hidrometeoros presentes a essas altitudes provocam erros.

Como consequência podem ocorrer extensos fenómenos de dissipação dos topos das nuvens e a massa de ar que originalmente era rica em hidrometeoros (incluindo gotas de chuva) nos níveis baixos apresenta baixo conteúdo em água, situação que poderá ser reforçada pela presença de ar seco entre a base das nuvens e a superfície.

- Propagação anômala: esta propagação altera a direção do feixe de radar mesmo que este esteja apontado para cima e tem o efeito da contaminação terrestre por refratar em direção ao solo (mede prédios ou superfície terrestre). Esta situação é frequente em algumas regiões onde a atmosfera está sujeita a forte diminuição da humidade ou grandes aumentos de temperatura com a altura e pode ser muito enganador para os técnicos de radar sem formação, sendo difíceis de eliminar no seu processamento.

Um dos problemas associados à estimativa da precipitação através do radar é conseguir determinar o espectro de gotas, pois diferentes espectros de gotas (distribuição do tamanho de gotas contidas no volume iluminado pelo radar) podem produzir a mesma refletividade, mas diferentes intensidades de precipitação (Battan, 1973 cit. por Moreira, 2005). Neste âmbito, a partir da refletividade, para além da intensidade de precipitação é também possível associar uma probabilidade de ocorrência de um tipo de fenómeno chuvoso (Fig. 3.13).

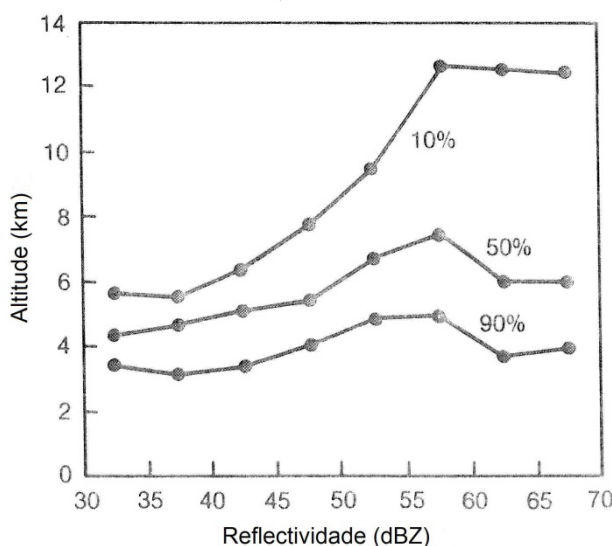


Figura 3.13 – Probabilidade de existência de células convectivas, em função do valor da refletividade expressa em dBZ e da altitude (adaptado de Collier, 1989).

3.1.2. Revisão bibliográfica sobre calibração do radar meteorológico

A refletividade transformada em precipitação, recorrendo a funções calibradas que descrevem a relação entre a refletividade de precipitação, estima uma precipitação pontual (unidade de pixel ou célula) ou espacial (agregada ou desagregada) na zona de alcance do radar meteorológico. A precipitação na área geográfica resulta da média aritmética dos pixéis (agregada) ou poderá ser associada a cada píxel situado na área em análise (desagregada), sendo a forma da sua utilização dependente do objetivo em questão. Por outro lado, a agregação poderá atenuar os eventuais erros de estimativa e a comparação das imagens do radar com a distribuição espacial obtida pela aplicação dos métodos para estimar precipitação na área descritos no capítulo 2 (Polígono de Thiessen ou IDW2-6) permitirá selecionar aquele que mais se aproxima da imagem de radar, tanto em termos de valor médio como de forma de distribuição da precipitação.

A informação meteorológica do radar calibrada poderá ser utilizada na modelação hidrológica quando não existirem observações de precipitação à superfície terrestre, registada nos udográfos, ou suplementar informação de precipitação onde não é monitorizada.

No século XX e XXI foram elaborados diversos estudos relacionados com os radares meteorológicos, nomeadamente estudos associadas à sua capacidade de detetar e medir variáveis meteorológicas. Entre os estudos consultados, com enfoque nos últimos 25 anos, efetuou-se uma seleção daqueles onde se utiliza a refletividade para estimar a distribuição espacial da intensidade de precipitação. Houve a preocupação de evitar repetir metodologias, tendo-se seguido os seguintes critérios:

- Que houvesse referência a métodos de calibração da refletividade do radar ou das estimativas de intensidades de precipitação pelo radar *versus* a intensidade de precipitação observada, ou abordagens visando a diminuição dos erros em relação aos valores observados. De preferência, as referências deverão indicar o processo de avaliações dos resultados.
- Que incorporassem análises hidrológicas com recurso ao radar meteorológico situado em Portugal.
- Que indicassem propostas de relações $Z - R$ associadas aos radares meteorológicos. Esta compilação é apresentada no subcapítulo 3.4 (Análise e discussão dos resultados da calibração) onde são apresentadas as relações determinadas neste estudo.

Com o objetivo de melhor sistematizar os estudos e facilitar a sua análise, foram elaborados os Quadros 3.3 e 3.4, onde se descrevem sucintamente os procedimentos metodológicos e respetivas conclusões, bem como se referem informações relevantes para os objetivos e eventual comparação com o procedimento adotado neste estudo. Com a análise do Quadro 3.3 poder-se-á inferir sobre o atual estado da arte no âmbito da calibração das estimativas de precipitação realizadas pelos radares meteorológicos. No Quadro 3.4 apresenta-se uma súmula das análises efetuadas associadas ao radar de Lisboa, que foi desativado. O radar de Lisboa, localizado nas instalações do ex-Instituto de Meteorologia, operava na banda C, com frequência de 5,5 GHz, com potência de pico de 250 kW, com largura do feixe de 1,5°, com largura do impulso de 2 μ s, frequência de repetição de 250 Hz, com ganho de antena de 38dB e um mínimo detetável de aproximadamente -102 dBm (1996, Macedo).

Foram analisados outros estudos enquadráveis nos critérios mencionados anteriormente, mas cuja informação de base não permitiu efetuar uma sistematização com o mínimo de informação de base (incompleta) e alguns

dos quais não eram centrados nas técnicas de calibração ou ajustamento das medições do radar meteorológico, designadamente relação $Z_{\text{disdrómetro}} - R_{\text{disdrómetros}}$, previsão meteorológica e da precipitação tendo como base a imagens dos radares meteorológicos, caracterização sinótica dos eventos monitorizadas pelo radar, metodologias para melhorar a análise da informação recolhida pelo radar visando eliminar o ruído (e.g., poeiras, aves, insetos, turbinas de vento) ou *Ground Clutter* e avaliação da precipitação baseada na refletividade diferencial. Os estudos consultados mostram que ainda não foi obtida uma relação que estime satisfatoriamente as precipitações ocorridas à superfície terrestre, pois em muitos o objetivo principal é propor ou validar as relações $Z - R$ já existentes. Existe, pois, dificuldade em obter uma calibração universal e fiável desta relação devido à existência de diversos fatores condicionantes (operacionais, tecnológicos e meteorológicos), que constituem desafios à ciência. Por fim, o interesse na calibração do radar meteorológico deve-se a este constituir uma ferramenta promissora e relevante para monitorizar a precipitação, principalmente em zonas onde existem dificuldades em a medir de uma forma continuada.

Quadro 3.3 – Síntese dos estudos consultados sobre a calibração da precipitação estimada por radares meteorológicos (internacionais)

Objetivo	Tipo de radar meteorológico e zona de estudo	Dados de base radar e udógrafos	Análise ou calibração	Método de avaliação dos resultados	Considerações finais
Hunter (1996)					
Identificar procedimentos, a implementar, que poderão melhorar as estimativas da precipitação do radar.	Radar WSR-88D (Weather Surveillance Radar 1988 Doppler) (EUA).	Precipitação de uma rede de 50 udógrafos.	Identificação de ações, a curto e a longo prazo, para melhorar as estimativas de precipitação do radar. Por exemplo, a curto prazo, calibrar o funcionamento do radar, definir o limiar do granizo, implementar estimativas médias por área (mais adequado aos objetivos da hidrologia), implementar diferentes ângulos de rastreio e implementar uma Base de Dados – (dados das 50 estações visando calcular os desvios das estimativas). Por exemplo, a longo prazo, determinar relações $Z-R$ adaptadas às condições meteorológicas (minimiza o erro das estimativas), implementar técnicas para ajustar as estimativas do radar às medições dos udógrafos, implementar a correção da <i>bright band</i> , e implementar correções de perfil vertical da refletividade.	(-)	O ajustamento das estimativas do radar através das medições, através dos filtros GDSS (<i>Gage Data Support System</i>) e Kalman não produzem, ainda, em alguns casos aos resultados ideais, mas melhora com a introdução de mais alguns registos de precipitação, devendo contudo ser estudado o ajuste considerando a introdução das condições meteorológicas. Identificou com prioridade máxima as a determinação das estimativas por área.
Crosson, <i>et al.</i> (1996)					
Avaliar a precisão das estimativas de precipitação do radar, numa situação convectiva, considerando duas metodologias (relação $Z-R$ e PMM - Método de Correspondência de Probabilidade).	Três radares WSR-57, Tampa, Daytona Beach, e West Palm Beach (Florida - EUA), cada um com alcance de 173 km.	Refletividades CAPPI – 4,5 km, 15 min com matriz de 2 km x 2 km, valor mínimo de 0 dBZ. Precipitações de 200 udógrafos, na zona <i>CaPE</i> , e de 21 udógrafos, na zona <i>Merritt Island cluster</i> , registadas entre 8 e 18 de agosto 1991, com diferentes durações e uma distribuição espacial determinada pelo método Shepard (1969, cit. por Crosson, <i>et al.</i> , 1996).	Comparação dos resultados da aplicação da relação $Z-R$ (WSR-88D – Convectiva) com o PMM adaptado (Calheiros e Zawadzki, 1987). A precipitação obtida pela aplicação da relação $Z-R$ corresponde a um grande viés em relação ao observado (desde +90% até -110%), considerando várias integrações temporais e espaciais. Resumidamente, a PMM tem como objetivo igualar a Função de Distribuição Provável (PDF) das estimativas de precipitação à PDF das refletividades, eliminando a obrigatoriedade da simultaneidade dos registos observados com os estimados. Este método só é aplicável para estimar precipitação em áreas e tempo suficiente para permitir a obtenção de uma amostra adequada, sendo definido por: $\int_{R_t}^{R_i} P(R) dR = \int_{Z_t}^{Z_i} P(Z) dZ$, Sendo $P()$ a função densidade de probabilidade e Z e R o limite inferior a considerar (limites determinados por aproximação). Com esta distribuição determina-se uma função matemática que descreve a relação $Z-R$, em função de variação de probabilidades. A partir desta função é possível identificar o limite dBZ a partir do qual corresponde ocorrência de precipitação (dZR)	As estimativas obtidas pela relação $Z-R$ e pelo PMM foram avaliadas através do viés em relação à média e do REQM, considerando vários intervalos de tempo e as duas zonas de análise. Para a avaliação espacial das estimativas de precipitação foram, também, determinados, para cada zona de análise, os coeficientes de correlação entre as estimativas do radar (relação $Z-R$ e PMM) e as precipitações observadas. A avaliação em espacial só considerou duração diária.	A determinação de um limiar mínimo de aplicação que melhorou significativamente os resultados da aplicação da relação $Z-R$ (-36,5 dBZ), limiar determinado pelo PMM, reduzindo o viés entre 20%-33%. Este limiar elimina áreas onde não ocorrem precipitações e reduz a sobrestimação resultante da aplicação da relação $Z-R$. A correlação entre as precipitações médias determinadas associadas a áreas são bastante melhores do que as obtidas para as estações udográficas. Os melhores resultados foram obtidos pelo PMM. A escala temporal mínima para aplicar PMM são vários dias. A área mínima de aplicação será inferior a 350 km ² .

Objetivo	Tipo de radar meteorológico e zona de estudo	Dados de base radar e udógrafos	Análise ou calibração	Método de avaliação dos resultados	Considerações finais
Ciach, <i>et al.</i> (1997)					
Implementar um procedimento de calibração das estimativas de precipitação do radar com as precipitações dos udógrafos.	Radar de banda C, Darwin (Austrália), com alcance de 150 km.	<p>Precipitações estimadas a partir das refletividades medidas pelo radar associadas às durações horárias, diárias e mensais, com matriz de 2 km x 2 km, valor mínimo de 12 dBZ.</p> <p>Precipitações de uma rede de 54 udógrafos, tendo sido analisado o período de 25 dias, compreendido entre dezembro de 1993 e janeiro de 1994.</p>	<p>As refletividades medidas pelo radar são corrigidas tendo em conta a atenuação, havendo para cada eco uma classificação sinótica (fenômeno convectivo ou estratiforme). A refletividade integra a variação da refletividade vertical acima e abaixo de um determinado nível (integração de informação de outros radares, para a mesma zona). Seguidamente, as refletividades são convertidas em intensidade de precipitação, através de regressões não lineares (distintas consoante o fenómeno sinótico) e recorrendo, também, a fator de correção em função da distância para o radar. As precipitações estimadas são acumuladas para as durações diárias, 5 dias e mensal. Opcionalmente, foi aplicado cokriging para ajustar as medições do radar e dos udógrafos.</p> <p>Determinação da relação entre a refletividade e a intensidade de precipitação estimada pelo radar ($Z - R$), tendo como base os registos dos udógrafos, isto é, através da minimização da raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM) calculado entre a intensidade da precipitação média do radar e dos udógrafos para uma determinada área, associado a durações diárias, 5 dias e mensal.</p>	<p>Avaliação dos resultados foi realizada recorrendo aos valores de REQM e da média do viés (média entre o valor estimado e o valor observado), associados às três durações.</p>	<p>A aplicação da metodologia permitiu obter com precisão adequada uma estimativa de precipitação baseada na relação $Z - R$, sendo o critério de otimização o REQM associado à análise diária. Contudo, não foram detetadas melhorias na estimativa resultante da pré-classificação do tipo sinótico.</p> <p>As constantes a e b da relação $Z-R$, apresentam uma variação que depende da distância entre o udógrafo e o radar, por exemplo: $Z = 21,8 R^{1,5}$ próximo do radar, $Z = 18,4 R^{1,8}$ a 75 km do radar, $Z = 15,6 R^{2,1}$ a 150 km do radar.</p> <p>Verificou-se que a aplicação da técnica de Cokriging melhora os resultados do REQM e do Viés.</p>
Fulton, <i>et al.</i> (1998)					
Apresentar o algoritmo "Precipitation Processing System" (PPS) que fornece estimativas de precipitação, baseadas no radar, de suporte à modelação hidrológica e atmosférica para previsão e aviso do National Weather Service.	Radares doppler WSR-88D, com alcance de determinação de 230 km (EUA).	<p>Refletividades.</p> <p>Precipitações de uma rede de udógrafos.</p>	<p>O algoritmo é constituído inúmeras ações, das quais se destacam as que estão mais relacionadas com o presente estudo. O método define três limiares: um associado às refletividades do <i>Ground-Clutter</i>, outro associado a pequenas refletividades logo reduzidas precipitações (ex. 0,1 mm) e o limiar a partir do qual o processador inicia o cálculo (acumulação da precipitação). As refletividades pré-processadas são transformadas em estimativas de precipitação pelas relações $Z - R$ (propostas para WSR-88D, situação padrão ou tropical), com precisão de 0,1 mm h⁻¹. É proposto um coeficiente para corrigir o não preenchimento do feixe, que será maior quanto mais afastado do radar estiver do local da estimativa.</p>	<p>Como as relações $Z - R$ não são adequadas a todos tipos de eventos chuvosos é aplicado horariamente um coeficiente, definido pelo erro quadrático médio (EQM). Este considera as precipitações dos udógrafos (U), as estimativas de precipitação do radar (R) na matriz com n o número da célula e é definido por</p> $EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (U - R)^2}{n}$	<p>Uma vez que a execução do PPS poderia não ser compatível com a obtenção em tempo real das estimativas de precipitações corrigidas é proposto, em alternativa, a determinação de filtro de Kalman (que utiliza medições realizadas ao longo do tempo e gera resultados que tendam a se aproximar dos valores reais das precipitações medidas).</p>
Fournier (1999)					
Avaliar a adaptabilidade da relação $Z - R$ normalmente utilizada	Rede de radares doppler WSR-88D banda S, (EUA).	Refletividades.	Comparação dos resultados obtidos por aplicação da relação $Z - R$ de convectiva do NWS ($Z = 300R^{1,4}$),	As precipitações estimadas pelas três relações foram	A relação normalmente utilizada pelo NWS subestimou a precipitação neste evento, mas o resultado é melhor do que o obtido por Marshall-

Objetivo	Tipo de radar meteorológico e zona de estudo	Dados de base radar e udógrafos	Análise ou calibração	Método de avaliação dos resultados	Considerações finais
no National Weather Service – NWS (EUA) para situações convectivas.		Precipitações registadas em outubro de 1996 (tempestade Josephine) na rede de monitorização do National Weather Service.	Marshall-Palmer (1948) e tropical do NWS ($Z = 250R^{1,2}$).	acumuladas em 24 horas e comparadas com as precipitações dos udómetros. O padrão da distribuição da precipitação foi razoavelmente semelhante, mas a precipitação total foi bastante diferente.	Palmer. Contudo a aplicação da relação tropical sobrestimou, não obtendo melhores resultados pois a tempestade analisada teve características subtropicais e não tropicais.
Antonio (1996)					
Comparar e ajustar a relação $Z - R$ obtida a partir das refletividades dos radares e dos registos dos disdrómetros, equipamento que estima a precipitação em função do tamanho das gotas de chuva.	Radares doppler de Bauru e Presidente Prudente, banda S, monitorizam um raio de 240 km (Brasil)	Refletividades horárias com matriz de 1 km x 1 km, obtida a partir de um CAPPI a 3,5 km. Precipitações de 5 ou 6 disdrómetros.	As refletividades na matriz do radar em redor dos disdrómetros (Z) (2 km x 2 km) são ajustadas às medições dos disdrómetros (R_d). As refletividades do radar estão associadas ao tamanho das gotas: $Z = aR^b$ sendo R igual a R_d : $R_d = \frac{\pi}{6A_d \Delta t} \sum n_i D_i^3$ onde A_d é a área do coletor do disdrómetro (m^2), Δt é o intervalo de tempo de integração dos dados, D_i é o diâmetro da gota i (mm), i varia entre 1 a 20, n_{Di} o número de gotas de diâmetro i .	Comparação entre as estimativas finais de precipitação horárias do radar e os registos dos disdrómetros.	(-)
Antonio (2000)					
Ajustar as refletividades dos radares aos registos dos disdrómetros ($Z - R$).	Radares doppler de Bauru e Presidente Prudente, banda S, monitorizam um raio de 240 km (Brasil)	Refletividades horárias com matriz de 1 km x 1 km, obtida a partir de um CAPPI - 3,5 km. Precipitações de 2 disdrómetros (Botacatu e Graça).	As refletividades na matriz do radar em redor dos disdrómetros (Z) (3 km x 3 km) são ajustadas às medições dos disdrómetros (R_d). As determinações dos disdrómetros considera um DSD (<i>Drop Size Distribution</i>) no período de 1 minuto, com diâmetro entre 0,3 e 5 mm, que foram acumulados na hora associadas à monitorização radar. Para cada evento de chuva e estação foi determinado uma relação $Z(\text{radar}) - R(\text{disdrómetro})$.	Determinação dos coeficientes de correlação de todas as relações $Z - R$ de disdrómetros (valores superiores a 0,95).	Relações globais obtidas: $Z = 236,0R^{1,26}$ (Botacatu) e $Z = 316,0R^{1,34}$ (Graça) Os resultados evidenciam a necessidade de calibrar as estimativas do radar e mostram boas e melhores relações para os eventos chuvosos de origem estratiforme (pequeno gradiente horizontal nas intensidades e um perfil vertical de refletividade aproximadamente constante).
Anagnost, et al. (2000)					
Aplicar uma metodologia que permite calibrar as estimativas de precipitação do radar meteorológico com as estimativas à superfície terrestres obtidas pelo satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission).	Radar doppler de Bauru (Brasil), banda S com alcance de 150 km.	Refletividades CAPPI – 2 km. Precipitações à superfície terrestre na área abrangida pelo radar, expressas em refletividades obtidas pelo TRMM (eventos chuvosos, abrangendo 20%	Calibrar o viés da refletividade do radar (Z) face à refletividade obtida pelo TRMM (Z_{PR}). Após minimizar fatores de erro (classificação sinótica, eliminação da banda brilhante, e minimização da atenuação do sinal associado a diversos fatores) determinam-se as diferenças das refletividades (dB) avaliadas pela média (B_{emp}) e variância (σ_{emp}^2) do viés, expressos por: $B_{\text{emp}} = \frac{1}{n} \sum (Z - Z_{PR}) \quad \sigma_{\text{emp}}^2 = \frac{1}{n} \sum (Z - Z_{PR})^2 - B_{\text{emp}}^2$ sendo, n o tamanho do evento chuvoso.	Determinação dos coeficientes de correlação entre as duas refletividades, que variaram entre 0,8 e 0,95 (boa correlação).	As diferenças das estimativas obtidas foram de cerca de -6 dB e são atribuídas, fundamentalmente, a erros da refletividade do radar. Provou-se, também, que as flutuações dos viés do radar, independentemente da metodologia utilizadas, não são significativos (< 1 dB).

Objetivo	Tipo de radar meteorológico e zona de estudo	Dados de base radar e udógrafos	Análise ou calibração	Método de avaliação dos resultados	Considerações finais
		do período 1997 a 1999).	Em alternativa, determina-se o coeficiente de viés que minimiza-se a função objetivo (média do quadrado da diferença entre as duas estimativas).		
Almeida e França (2002)					
Determinar relações $Z - R$ adaptadas a situações sinóticas convectivas e precipitação generalizada, para a região metropolitana do Rio de Janeiro. Proceder à comparação com outras relações $Z - R$ já existentes.	Radar do Pico do Couto, de impulso e doppler, banda S, localizado a aproximadamente 60 km da região metropolitana do Rio de Janeiro (Brasil).	Refletividades em cada 30 min, obtidas a partir de CAPPI, com matriz 1 km x 1 km. Precipitações de 30 udógrafos, com análise de 5 eventos chuvosos (2000)	Classificação da refletividade de cada célula em convectiva ou geral, consoante o algoritmo baseado no valor da refletividade (Steiner, <i>et al.</i> , 1995, cit. por Almeida e França, 2002). Determinação por ajustamento da relação $Z = aR^b$ a partir da precipitação dos udógrafos e correspondente refletividade registada na célula onde se localiza a estação, consoante a classificação sinótica. Foram rejeitados os seguintes pares de valores: a) R nulo e Z inferior a 10 dBZ; b) Reduzidos R e altos Z ; c) Altos R e baixos Z .	Determinação dos REQM para avaliar os ajustamentos às relações obtidas, bem como às propostas por Marshall-Palmer, Joss (Convectivo) e Austin (cit. por Almeida e França, 2002).	As relações obtidas por tipo sinótico são: Convectivo $Z = 670R^{1,23}$ e Geral $Z = 289R^{1,47}$. Os resultados indicam, tendo em consideração os os erros obtidos, não existir, entre as opções testadas, uma melhor relação $Z - R$, sendo que este processo de estimativa não é apropriado para quantificar a precipitação local. Devido às grandes incertezas na estimativa da precipitação obtidas pela relação $Z - R$ é indiferente a escolha da relação, pois a grandeza dos erros encobre as diferenças das estimativas. Sugere-se o uso de valores médios por área da precipitação em substituição de valores pontuais dos udógrafos.
Calvetti, <i>et al.</i> (2003)					
Integrar as medições do radar meteorológico e as medições udográficas visando melhorar a estimativa da distribuição espacial da precipitação para a região metropolitana de Curitiba.	Radar SIMEPAR (modelo DWSR-95S/EDGE) Doppler, banda S, com alcance de 480 km, mas com área de quantificação de 240 km de alcance.	Refletividades horárias obtidas a partir de CAPPI – 3 km, com matriz 4 km x 4 km. Precipitações e caudais de 36 estações de monitorização para 1 evento chuvoso.	Aplicação do método Análise Objetiva Estatística (ANOBES), que considera estatisticamente a influência da distância dos udógrafos para cada quadrícula do radar para calibrar as estimativas de precipitação do radar, obtidas por aplicação da relação $Z - R$ (Marshall-Palmer, 1948). Os pesos utilizados são os obtidos por aplicação do método, que também foi aplicada por Beneti, <i>et al.</i> (2002), recorrendo ao mesmo radar.	As precipitações foram comparadas com as precipitações dos udógrafos, tendo sido avaliadas as diferenças para as diferentes regiões na área analisada.	A distribuição espacial da precipitação analisada e a precipitação dos udógrafos são coerentes e as correções são restritas às áreas ao redor dos udógrafos e, por isso, para melhorar as estimativas do campo de precipitação deve-se ampliar as medições com a rede udográfica.
Chumchean <i>et al.</i> (2004 e 2006)					
Propor correção automática, em tempo-real, da precipitação horaria estimada pelo radar por precipitações dos udográficas. E avaliar a densidade de estações udográficas que permite obter a melhor calibração.	Radar de Kurnell, até alcance de 120 km, Sydney (Austrália).	Precipitações obtidas a partir de CAPPI - 1,5 km e de uma rede udográfica, tendo sido analisados 28 eventos chuvosos (registados entre Novembro de 2000 e Abril de 2001).	Comparação da calibração utilizando dois métodos: o filtro de Kalman e um fator de Correção através da média do viés do quociente médio horário entre P (chuva do udógrafo) e R (chuva do radar) ou através da caracterização da média do viés pelo modelo autorregressivo AR(1), cuja média do viés é determinada pelo filtro de Kalman. Este último método permitirá ultrapassar os aspetos relacionados com o funcionamento do radar e as características do fenómeno meteorológico. Foram consideradas precipitações superiores a 1 e 0.5 mm h ⁻¹ , excluídas as refletividades inferiores a 15 dBZ e superiores a 53 dBZ (conforme proposto por Fulton <i>et al.</i> , 1998), eliminado o efeito de Ground Clutter e realizada uma pré-classificação sinótica (convectivo ou estratiforme).	Avaliação dos resultados do filtro de Kaman resulta da comparação entre o viés dos quocientes calibrados e os observados. Determinação do REQM (Eq. 3.18) visando avaliar a densidade de estações mais apropriada para a calibração.	A correção simples do viés do quociente conduz a menores valores de REQM, quando se utiliza um grande número de udógrafos (1 estação/70 km ²), sendo melhores os resultados da aplicação do filtro de Kalman para densidades menores do que 1 estação/90 km ² . O número de estações necessárias para correção do viés é menos nas situações sinóticas estratiformes. A correção do viés não será uma opção para as precipitações convectivas e, portanto, é preferível utilizar as relações $Z - R$.

Objetivo	Tipo de radar meteorológico e zona de estudo	Dados de base radar e udógrafos	Análise ou calibração	Método de avaliação dos resultados	Considerações finais
Moreira (2005 e 2006)					
Avaliar o impacto das diferentes formas de avaliar a precipitação no modelo hidrológico IPH II, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas /Universidade Federal do Rio Grande do Sul.	Radar SIMEPAR (modelo DWSR-95S/EDGE) banda S, com alcance de 240 km Bacia hidrográfica do rio Barigüi, com área de 279 km ² , Curitiba, Paraná (Brasil).	Estimativas de precipitação horárias resultantes da relação Marshall-Palmer obtida a partir de CAPPI – 3 km, com matriz 1 km x 1 km, Precipitações de 17 udógrafos e caudais de 7 estações hidrométricas, com análise de 5 eventos chuvosos.	Calibração das estimativas do radar com os registros udográficos através da análise estatística ANOBES – Análise Objetiva Estatística (Gandin, 1963). O método adaptado por Pereira e Filho, <i>et al.</i> (1998) e Pereira e Filho (1999) para os radares NEXRAD (ou WSR-88D) dos EUA, é descrito por: $P_e(x_r) = P_{rad}(x_r) + \sum_{k=1}^{N_e} W_k [P_r(x_k) - P_{rad}(x_k)]$ sendo $P_a(x_r)$ altura de precipitação calibrada na matriz do radar (mm); $P_{rad}(x_r)$ a altura de precipitação estimada pelo radar na matriz do radar (mm); $P_g(x_k)$ a altura de precipitação registrada no udógrafo (mm); $P_{rad}(x_k)$ a altura de precipitação estimada pelo radar no udógrafo (mm); W_k o peso à <i>posteriori</i> a determinar pela configuração dos dados da rede (-); N_e o número de estações udográficas; x_r e x_k as posições na matriz do radar. ANOBES minimiza a variância esperada do erro da análise em relação aos pesos, sendo a expressão normalizada para os pesos dada por: $\rho_{kl} = \sum_{k=1}^{N_e} W_k (\rho_{kl} + \varepsilon_k^2) \quad 1 \leq k \leq N_e$ sendo ρ_{kl} a correlação entre o erro do valor inicial dos udógrafos k e l ; ε_k^2 o erro observado normalizado; ρ_{kl} a correlação entre o erro do valor inicial do udógrafo k e a célula da matriz do radar l .	Comparação dos hidrogramas obtidos pela modelação hidrológica, com as várias quantificações de precipitação (udógrafos, radar com e sem calibração), e os caudais observados.	O método ANOBES, recomendado pela WMO (1970), melhora a estimativa da precipitação do radar, pois o radar sem calibração ora subestima ora sobrestima, consoante as características sinóticas do fenómeno meteorológico.
Gonçalves <i>et al.</i> (2006) que adota o Método de Brandes (1975)					
Calibrar as estimativas do radar a partir de uma rede de udógrafos e utilizá-las no modelo hidrológico (CABC), a incorporar no Sistema de Alerta a inundação de São Paulo (SAISP).	Zona norte de São Paulo, rio Cabuço de Baixo (Brasil).	Estimativas de precipitação obtidas por 3 relações Marshall-Palmer (1948), Padrão-NWS (EUA, 2002), e Massambani e Rodrigues (1988) (cit. por Gonçalves, <i>et al.</i> , 2006). Precipitações de duas estações udográficas e para 1 evento de cheia.	Aplicação às estimativas da precipitação, através das três relações Z - R, o método de calibração de Brandes (1975). Neste método é transformada a Eq. 3.1. e são determinados fatores de peso associados aos registros udográficos.	Comparação das precipitações estimadas, com e sem a aplicação do método de Brandes (1975), com as observadas. Testadas seis hipóteses: três relações Z - R, com ou sem calibração.	A calibração melhorou as estimativas de precipitação do radar, mas em ambas as situações conduz à subestimação dos caudais.
Brandes (1975) pretendeu provar a melhoria das estimativas do radar através da sua	Radar NSSL WSR-57, banda S, onde a sua equação (Eq.3.1),	Estimativas da refletividades provenientes da aplicação da Eq.	Calibração da estimativa da precipitação inicial do radar (Marshall.Palmer, 1948) com a precipitação ponderada dos udógrafos com influência na célula do radar. O peso de cada estação na matriz do radar (W)	Comparação das precipitações registradas (com o mínimo 2,5 mm) com as diversas	A avaliação espacial da precipitação baseada na calibração do radar conduziu erros médios das estimativas entre 13 e 14 %. (que corresponde a precipitações entre 1,5 e 1,8 mm). A mesma

Objetivo	Tipo de radar meteorológico e zona de estudo	Dados de base radar e udógrafos	Análise ou calibração	Método de avaliação dos resultados	Considerações finais
calibração com dados dos udógrafos e utilidade destas estimativas em zonas não cobertas pelos udográficos.	incorpora as suas características bem como o efeito da atenuação do radome, a absorção da atmosfera, a atenuação da chuva e o gradiente vertical da precipitação.	3.1 transformada em $\log Z = 0,1\bar{P}_r + 7,73 + 2 \log r_d$. Sendo \bar{P}_r e r_d a potência média recebida pelo radar (dBm) e a distância a que se encontram as partículas (km). Precipitações da rede udográfica associado a 9 eventos convectivos.	é função da densidade da rede de monitorização - EP (km^2) e da distância das estações às células da matriz do radar – D_u (km): $W_i = \exp\left(-\frac{D_u^2}{EP}\right)$. A calibração das estimativas do radar é efetuada em duas etapas. F_1 é a primeira estimativa da precipitação numa célula da matriz do radar visando a aproximação com as precipitações observadas (P_i), nos N_e udógrafos na área de análise, $F_1 = \sum_{i=1}^{N_e} W_i P_i / \sum_{i=1}^{N_e} W_i$. F_2 é a segunda e última estimativa, que resulta do somatório das diferenças (D_d), entre a precipitação na estação udográfica e o valor mais próximo na matriz F_1 ($D_d = P_i - F_1$): $F_2 = F_1 + \sum_{i=1}^{N_e} W_i D_i / \sum_{i=1}^{N_e} W_i$. Sendo W_i calculado considerando uma redução de 50% de EP. Finalmente, multiplica-se o valor da estimativa do radar na célula pelo valor de F_2 .	estimativas de precipitação (estimativas do radar sem ponderação ou com ponderação) através da determinação dos erros médios (mm e %). Os dados dos udógrafos foram considerados a “verdade do-terreno”.	estimativa efetuada apenas com as precipitações dos udógrafos resulta em erros médios entre 21 e 24 %. O procedimento proposto permite também, obter estimativas em zonas cobertas pelo radar com dados de pouca qualidade (e.g., em áreas com <i>Ground Clutter</i> , excessivamente distantes do radar ou com problemas de propagação do sinal).
Figueiredo e Martim (2007)					
Avaliar a melhor de sete relações Z - R: Marshall-Palmer (1948); António (1998); Seklon, <i>et al.</i> (1971); Jones (1956); Tokay 1, 2 e 3 (1996, cit. por Figueiredo e Martim, 2007) visando disponibilizar à comunidade agrícola e científica a determinação da precipitação mensal e anual com alta resolução espacial.	Radar doppler banda S; com alcance de 240 km São Paulo (Brasil).	Refletividade horárias associadas a CAPPI, com matriz 1 km x 1 km. Precipitações registadas num udógrafo a 90 km do radar (1994-2004, exceto 1999, de novembro a março).	Comparação entre as precipitações observadas e a média de 5 quadrículas de estimativa de precipitação, associadas aos pontos da matriz mais próximas do udógrafo.	Determinação, considerando os dados do udógrafo como a “verdade do terreno”, da Raiz quadrada dos Erros Quadráticos Médios – REQM (Eq.3.18) e do Erro Relativo Médio-; ERM (Eq.3.19).	As melhores relações (menores ERM) são Marshall-Palmer (1948), António (1998) e Seklon <i>et al.</i> (1971).
Quian Dai, <i>et al.</i> (2013)					
Determinar um conjunto de valores para modelar a incerteza (erros) da estimativa da precipitação obtida pelo radar, baseado na função de distribuição Cópula e num filtro autorregressivo.	Radar Warden Hill localizado a 40 km do centro da Bacia hidrográfica de Brue (Inglaterra).	Refletividade horárias associadas a CAPPI e matriz 2 km x 2 km. Precipitações registadas em 28 udógrafos (outubro de 1993 a abril de 2000), tendo sido analisados 4 eventos chuvosos.	Determinação de uma distribuição multivariada Cópula para cada célula, a partir da modelação do erro marginal da distribuição definida pelo quociente da precipitação observada (P) e da estimativa de precipitação do radar (P_{rad}). Aos erros aleatórios obtidos foram aplicados um modelo autorregressivo AR(2), com coeficientes de Lagrange para os tempos -1 e -2, de forma a manter as características da distribuição espacial e temporal dos eventos chuvosos.	Os resultados foram avaliados recorrendo ao Erro Médio Absoluto e ao coeficiente de correlação de Kendal (1970).	A superfície de incerteza da precipitação simulada abarca a maioria das medições dos udógrafos e tem uma relação espaço temporal bastante boa com as observadas, o que indica que a metodologia é estatisticamente confiável na estimativa de precipitação pelo radar.

Objetivo	Tipo de radar meteorológico e zona de estudo	Dados de base radar e udógrafos	Análise ou calibração	Método de avaliação dos resultados	Considerações finais
Nogueira, <i>et al.</i> (2015)					
Validar quatro relações $Z - R$ com as precipitações dos udógrafos.	<p>Radar de Belém-PA, banda S, com alcance de 240 km</p> <p>Zona da Amazônia oriental (Brasil).</p>	<p>Refletividades associadas ao CAPPI de 2,2 km, 2,7 km e 3,2 km.</p> <p>Precipitações registradas em 3 udógrafos (julho 2014).</p>	<p>Comparação das precipitações dos udógrafos (matriz de 9 quadriculas) com as estimativas de precipitação do radar, obtidas pelas relações $Z - R$ Marshall-Palmer, WSR-88D (para chuva convectiva e para chuva tropical), Joss (chuva tempestade) através de regressão linear. Foram comparados estimativas de obtidas a partir dos três CAPPI. Semelhante análise foi efetuada considerando a classificação do fenómeno sinótico.</p>	<p>Determinação de coeficientes de determinação (r^2) das regressões lineares.</p>	<p>De uma maneira geral, as estimativas de chuva obtidas por Marshall-Palmer subestimaram a precipitação registada nos udógrafos. A relação $Z - R$ (chuva convectiva) é a que melhor se ajustou aos dados (coeficiente angular de 0,944). Os r^2 das regressões ficaram compreendidos entre 0,6 e 0,7.</p>

Quadro 3.4 – Síntese dos estudos consultados sobre a calibração da precipitação estimada por radares meteorológicos (nacionais).

Objetivo	Tipo de radar meteorológico e zona de estudo	Dados de base utilizados (radar e udógrafos)	Análise ou calibração	Método de avaliação dos resultados	Conclusões
Barbosa (1991)					
Avaliar os processos disponíveis para ajustar as medições de radar às medições provenientes dos udógrafos, tendo em consideração a precisão da precipitação estimada em tempo real, relevante para a previsão de cheias.	(-)	(-)	Os processos descritos avaliados são agrupados em quatro categoriais: a) técnicas com recurso aos quocientes entre G/R, sendo G precipitação observada no udógrafo e R a precipitação estimada pelo radar; b) técnicas mais sofisticadas, que relacionam os dados do radar e dos udógrafos, como a análise de função objetivo, o filtro de Kalman e o Cokriging.	Se houver erro sistemático devido a grande variabilidade na relação radar-udógrafo, não é o ajustamento que permita melhorias. Uma maneira de compensar estas diferenças é a utilização do teste sequencial que, apesar de ser adequado para uso em tempo real, seria mais rápido se qualquer desvio conhecido fosse removido antes do ajustamento.	A utilização de técnicas com recurso G/R pode conduzi a erros entre 13 e 27 %, menor que sem ajustamento (43 a 55 %). Entre as técnicas mais sofisticadas, a função objetivo é a que conduz a melhores resultados, mas tem constrangimentos computacionais o que não se ajusta ao tempo-real. Para previsão de cheias rápidas os filtros de Kalman com Cokriging melhoram substancialmente a qualidade do ajustamento, desde que ambos os processos ocorram no mesmo ambiente.
Hipólito, <i>et al.</i> (1995)					
Descrever o sistema de aviso de cheias em tempo real para a povoação de Alenquer, composto por três módulos: previsão da precipitação, calibração da precipitação do radar e modelação hidrológica.	Radar meteorológico de Lisboa-Aeroporto (Portugal), banda C. Área de alcance de 190 km ou 74 km.	Precipitação horária estimada para uma matriz com células de 5 x 5 km ² (baixa resolução) e 2 x 2 km ² (alta resolução). Precipitações da rede de monitorização do ex-IM e ex-INAG.	Desenvolvimento do modelo hidrológico baseado no programa HEC-1 com utilização do hidrograma unitário de Clark e com a incorporação do hidrograma unitário específico para a bacia de Alenquer, este determinado através da análise dos hidrogramas em S obtidos a partir aos registos históricos de precipitação e caudal (1981-1994).	Obtenção de modelo hidrológico calibrado para situações de cheia que permite validar a distribuição espaço temporal das estimativas da precipitação provenientes do radar.	(-)

Objetivo	Tipo de radar meteorológico e zona de estudo	Dados de base utilizados (radar e udógrafos)	Análise ou calibração	Método de avaliação dos resultados	Conclusões
Saramago (1995)					
Melhorar a estimativas de precipitação do radar de Lisboa.	Radar meteorológico de Lisboa-Aeroporto (Portugal), banda C. Área de vigilância com abrangência de 225 km ² .	Precipitação horária estimada para uma matriz com células de 2 km x 2 km e 5 km x 5 km. Precipitações horárias de cinco estação udográficas ("verdade-do-terreno").	Ajustar, para cada instante, a estimativa da precipitação, das células onde se localizam duas estações udográficas (representativas da orografia da área de estudo), à observada nos udógrafos através da aplicação do algoritmo de filtro de Kalman (Harvey, 1990, cit. por Saramago, 1995). Com os fatores de calibração e a utilização da interpolação multiquadrática desenvolvida por Moore (1991) obteve-se uma superfície de fatores, que são aplicados à matriz das estimativas da precipitação do radar, obtendo-se uma distribuição espacial da precipitação ajustada aos registos observados.	A avaliação dos resultados recorreu às estimativas o REQM e ERM, considerando a precipitação observada na quadricula a obtida pelo método dos Polígonos de Thiessen determinados a partir das cinco estação udográficas.	A calibração conduziu a uma ligeira redução da precipitação média e a melhorias na estimativa da precipitação obtida pelo radar (diminuição do erro relativo de 99,3%).
Macedo (1996)					
Propor modelo de previsão de cheias em tempo real para a bacia do rio Alenquer, com recurso à informação radar de Lisboa. O modelo é composto pelo módulo de previsão da precipitação medida pelo radar (RADNET); de calibração radar-udómetro (CALIBRA) e de modelação hidrológica (SIMUL). Existe o enfoque no módulo SIMUL.	Radar meteorológico de Lisboa-Aeroporto (Portugal), banda C. na bacia hidrográfica de Alenquer (afluente do rio Tejo).	Precipitação estimada pelo radar dentro de um raio inferior a 74 km e, por isso, informação com células 2 km x 2 km, sem ocultações de cobertura. Precipitações de cinco estações udográficas,	Calibrar o modelo hidrológico recorrendo a registos de onze cheias (registadas entre dezembro de 1981 e fevereiro de 1994), utilizando as precipitações ponderadas, pelos Polígonos de Thiessen, em cada meia hora, e os caudais na estação hidrométrica de Ponte de Barnabé. As cheias foram simuladas pelo método do hidrograma unitário de Clark recorrendo ao disponível no modelo HEC-1, e, seguidamente, determinou-se o melhor hidrograma unitário pelo processo de desconvolução. O módulo RADNET realiza a extrapolação linear dos ecos do radar através da comparação de duas imagens do radare é calculado o vetor deslocamento pela técnica de correlação cruzada. O módulo CALIBRA aplica o modelo de regressão linear entre a precipitação de cada udógrafo calibrador e a célula do radar que o contém, sendo os fatores de calibração obtidos por um algoritmo baseado nos filtros de Kalman (Saramago, 1995).	O processo de desconvolução para obter o melhor hidrograma unitário e unitário adimensional de cada cheia através do método dos mínimos quadrados (MMQ), com restrições. Posteriormente, selecionou-se um único hidrograma unitário através do estabelecimento de semelhanças entre os hidrogramas em S adimensionais e as funções de distribuição de probabilidades. Os coeficientes de correlação das previsões de caudal são de um modo geral de maior qualidade do que as previsões da precipitação. Como expectável, quando aumenta o tempo de avanço das previsões, a respetiva qualidade diminui.	Utilização das estimativas calibradas de intensidade de precipitações do radar na previsão dos caudais e dos hidrograma unitário determinado para a bacia do rio Alenquer. São realizadas 6 previsões de caudal (em cada meia hora) a ocorrer até 3 horas seguintes A utilização de previsões calibradas da precipitação como uma validação exige a utilização de mais dados para ajuizar o desempenho do método proposto.
Macedo e Hipólito (1997)					
Descrever o sistema de aviso de cheias em tempo real para a povoação de Alenquer, com referência específica ao modelo hidrológico.	Radar meteorológico de Lisboa-Aeroporto (Portugal), banda C. Bacia hidrográfica de 114 km ² localizada no rio Alenquer.	Precipitação estimada pelo radar. Precipitações nas estações udográficas com influência na bacia em estudo (cit. por Macedo, 1996)	Simulação hidrológica de eventos de cheia, recorrendo à previsão da evolução da precipitação, realizada pela extrapolação da deslocação dos sinais recebidos efetuada a partir de coeficientes de correlação cruzada entre imagens sucessivas (Rodrigues, 1995), sendo que estas previsões vão sucessivamente sendo substituídas por dados observados em tempo real como dado de entrada no modelo hidrológico.	Determinação de coeficiente de correlação entre os caudais observados e as respetivas previsões.	Embora os coeficientes de correlação diminuam com o avanço da previsão, como seria de esperar, variam entre 0,99 e 0,50 para previsões de caudal entre 0,5 h e 3 h.

Os estudos consultados e os selecionados apresentam uma grande panóplia de altitudes de CAPPI, enquanto as dimensões das matrizes das imagens dos radares são mais semelhantes entre si. A existência de diversos CAPPIs em conjugação com as distâncias às estações udográficas têm implicações diretas na qualidade dos resultados, uma vez que os CAPPI associados a maiores altitudes corresponde a uma monitorização mais afastada da estação udográfica. Face à bibliografia consultada, o presente estudo utiliza um CAPPI a baixa altitude, um grande número de estações udográficas (1 estação/12 km²), com elevado número de registos simultâneos do radar e do udógrafo, o que permite obter uma informação de base de elevada qualidade quando comparada com os estudos consultados.

Na bibliografia consultada são propostas ou aferidas relações *Z-R* recorrendo a registos udográficos pontuais ou considerando uma rede de estações. No presente estudo, em virtude de terem sido apenas disponibilizadas estimativas de intensidade de precipitação do radar, serão estabelecidas relações *U-R*, isto é, relações do tipo potencial entre a intensidade de precipitação observada nos udógrafos (*U*) e as estimadas pelo radar (*R*), sendo, propostas relações pontuais e espaciais. Deste modo pretende-se corrigir as estimativas pré-definidas pelo radar.

A bibliografia refere a mais-valia de definir o limite mínimo de refletividade ou precipitações mínimas registadas nos udógrafos para permitir obter melhores ajustamentos das relações *Z-R* e nalguns casos existe a associação dos registos udográficos a um conjunto de células da matriz do radar. A definição de limiares mínimos de refletividade ou de precipitação nos udógrafos não foram considerados e os períodos temporais pré-selecionados permitem, potencialmente, evitar a existência de elevados instantes com precipitações insignificantes (apenas eventos chuvosos com precipitações significativas). Por outro lado, face à resolução espacial dos dados do radar é possível relacionar com precisão a célula do radar com a localização da estação udográfica, não sendo necessário selecionar uma área mais alargada do que o pixel ou célula onde se localiza o udógrafo.

Os estudos consideram os registos dos udógrafos como a “verdade do terreno” (apesar destas observações poderem não possuir representatividade espacial, visto estarem sujeitas à ação do vento, que pode provocar a diminuição da coleta de gotas de chuva) e efetuam uma pré - avaliação da qualidade das estimativas do radar (com eliminação de contaminantes e de dados que levantam dúvidas e que podem estar associados ao funcionamento inadequado do radar). No presente estudo optou-se, também, pela mesma “verdade do terreno”, não tendo sido implementada nenhuma pré - avaliação pois as estimativas de precipitação do radar utilizadas resultaram já do procedimento de tratamento e validação adotado pelo IPMA, I.P..

Uma grande parte dos estudos avalia a qualidade dos resultados dos ajustamentos entre a intensidade a precipitação observada à superfície terrestre e a estimada pelo radar, através da determinação de diversos desvios, por exemplo, REQM, viés, ERM e do coeficiente de correlação (referidos ao longo dos dois quadros anteriores, Quadros 3.3 e 3.4), e uma vez que alguns resultados visam apoiar a previsão de cheias, têm incorporada uma validação hidrológica, através da comparação entre os caudais observados e os simulados por modelo hidrológico. Neste estudo, a avaliação da qualidade do ajustamento das estimativas das relações *U-R* efetua-se através da avaliação do REQM, do ERM e do coeficiente de correlação (*r*). Os resultados da aplicação das relações *U-R* são também utilizados como dados de entrada ao modelo hidrológico do capítulo 5

e, como tal, sujeitos a uma avaliação dos resultados a partir da comparação entre os caudais simulados e os observados nas estações hidrométricas.

Uma parte dos estudos realiza a análise considerando a integração de várias durações, a integração na área e a classificação prévia da origem sinótica dos eventos chuvosos. No presente estudo realiza-se uma análise pontual global (considerando a totalidade dos registos das estações udográficas e das respetivas células do radar na zona geográfica em análise) e pontual associada a dois tipos sinóticos (considerando a totalidade dos registos das estações udográficas e das respetivas células na zona em análise, mas cujo evento chuvosos foi pré-classificado de acordo com o fenómeno meteorológico responsável pela precipitação em análise). É também efetuada uma análise espacial por bacia hidrográfica e por região geográfica, resultante da integração das sete bacias hidrográficas.

Entre os estudos consultados existe, também, a correção da relação $Z-R$ à *posteriori*, através da minimização do viés médio ou da minimização do somatório do viés, através de diversas abordagens de modelação. Este aspeto não será considerado nesta primeira análise às estimativas do radar, sendo um desenvolvimento futuro relevante e interessante com a integração de um maior número de dados associados às diversas situações sinóticas.

A melhoria da estimativa da precipitação efetuada pelo radar meteorológico em Cruz do Leão, recorrendo às precipitações registadas nos udógrafos, é realizada nos subcapítulos seguintes, onde são apresentadas propostas de calibração pontual da precipitação, considerando ou diferenças sinóticas, e para regiões geográficas, visando a sua integração no modelo hidrológico calibrado no capítulo 5.

3.2. O radar meteorológico de Cruz do Leão

Desde 1998, o radar meteorológico situado em Cruz do Leão (Coruche) e as respetivas infraestruturas estão instaladas numa torre com as coordenadas geográficas de 39,0724996°N, -8,398889937°W, estas indicadas nos ficheiros do radar (Fig. 3.14), integrando uma rede de radares meteorológicos, constituída por mais dois radares, situados em Cavalos do Caldeirão (Loulé) e em Cabeço do Pico do Gralheiro (Arouca), instalados, respetivamente, em 2005 e 2015.



Figura 3.14 -Vista geral da torre do radar meteorológico do radar meteorológico em Cruz do Leão (Coruche), <http://www.ipma.pt/pt/educativa/> e fotografias do autor.

O radar VRM100 de impulso, situado em Cruz do Leão (Coruche) e em pleno funcionamento desde 2000, é um sistema *Doppler magnetron* de banda C, que fornece informação sobre o vento e refletividade (Z), obtida a partir da amplitude do sinal recebido. No Quadro 3.5 são apresentadas as principais características deste radar meteorológico.

Quadro 3.5 – Principais características técnicas do radar em Cruz do Leão (Coruche).

Descrição técnica	Característica do radar em Cruz do Leão (Coruche)
Modelo do radar	<i>Gematronik</i> METEOR 360 AC
Tipo transmissor	<i>Magnetron</i>
Tipo de Banda	Vaisala de banda C
Faixa de comprimento de onda	5,32 cm
Faixa de frequência de operação	5640 MHz ou 5,640 GHz
Potência do transmissor	285 kW (medida), 250 kW (nominal)
Frequência da repetição dos impulsos (número de amostragem – impulsos para obter o valor observado) por azimuth	16 impulsos (tempo) 4 range bins/km (distância)
Largura ou duração do impulso (curto)*	0,8 μ s
Largura ou duração do impulso (longo)	2 μ s
Largura ou abertura do feixe (φ)	0,95 °
Tipo do controlador de radar	<i>Gematronik</i> RCP
Tipo de Antena	Reflector parabólico
Diâmetro da antena	4,2 m
Polarização	Linear horizontal
Ganho da antena	45,31 dB
Sinal mínimo detetável (MDS) em função da distância (dBm)	impulso longo: -112 dBm; impulso curto: -109 dBm
Alcance do radar (raio)	300 km (vigilância meteorológica); 150 km (medição da precipitação)
Resolução*	0,99749X0,99749 km ² (600x600 células)
Ângulo do radar com a superfície terrestre ou ângulo de elevação do radar (elevação do rastreio) (γ)	0,1 °, 0,9°, 1,9° e 2,9° (são, portanto, efetuadas quatro amostragens associadas aos quatro ângulos de elevação)
Altitude	180 m
Velocidade de rotação	28 ° s ⁻¹
Duração aproximada da rotação completa da antena	12,86 s

Legenda:* - Elementos obtidos a partir dos ficheiros RAIN1.

A partir dos dados recolhidos por este radar é possível obter vários produtos meteorológicos, recorrendo a diversos algoritmos, por exemplo, os PPI e CAPPI mencionados na alínea 3.1.1.. Para a calibração do radar em Cruz de Leão utilizam-se as estimativas de intensidade de precipitação obtidas a partir de mapas pseudo-CAPPI (forma modificada do CAPPI - Constant Altitude *Plan Position Indicator*). O IPMA, I.P., forneceu as estimativas da intensidade de precipitação, RAIN_i, resultantes da integração da precipitação ao longo de um intervalo de tempo horário (i igual a 1), por píxel (célula) de 1 x 1 km², RAIN1. O Pseudo-CAPPI (PCAPPI) fornece a intensidade horária da precipitação (R) ou da refletividade (Z), calculada para uma altitude constante de 1000 m, resultante da soma de 6 valores obtidos em 10 minutos.

O algoritmo CAPPI fornece os dados de base do produto desejado associado a uma determinada altitude constante. Para contruir o CAPPI, o radar rastreia (monitoriza) a atmosfera até ao seu raio de alcance (abrangendo vários azimutes) com sucessivos ângulos de elevação da antena (ângulos pré-definidos), normalmente realizado do menor para o maior ângulo. Na Fig. 3.15 representa-se os feixes do rastreio

associado a um determinado azimuth. Após a conclusão do rastreamento em torno do radar é possível obter CAPPIs e PCAPPs associados a diversas altitudes.

O CAPPI fornece apenas dados para a área monitorizadas pelos feixes, enquanto o PCAPPI fornece dados também para áreas não monitorizadas pelos feixes. Entende-se por área monitorizada pelo rastreamento do radar, a uma determinada altitude, a que está situada acima do feixe com menor ângulo de elevação e abaixo do feixe com maior ângulo de elevação (Fig. 3.15). As estimativas efetuadas na zona do rastreamento resultam da média dos valores obtidos pelos feixes contíguos para uma determinada altitude (Fig. 3.15). Na obtenção do CAPPI às áreas não monitorizadas, isto é, não intercetadas pelos feixes do radar, não é atribuído nenhum valor, enquanto na obtenção do PCAPPI estas áreas são preenchidas com os valores associados aos feixes com maior e menor elevação, consoante a área está mais próxima ou mais afastada do radar, respetivamente.

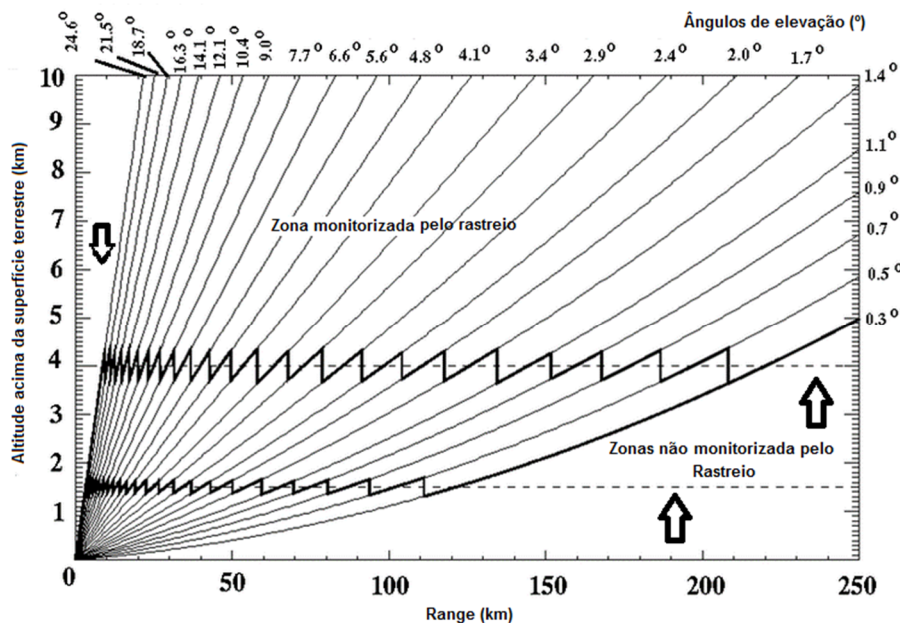


Figura 3.15 – Gráfico do alcance de um radar meteorológico versus altura do feixe de altura central, sob condições padrão de refratividade, e esquema exemplificativo para obter CAPPI.

Em 2006, o radar meteorológico em Cruz do Leão alterou o seu processador e controlo de antena passando a ser um RCP8, com alterações no rastreamento de aquisição de dados e alteração da filtragem dos dados de base (deixou de utilizar imagens com sinais ou ecos fixos).

Conforme já referido na alínea 3.1.1., a estimativa da precipitação realizada por radares meteorológicos pode estar associada a erros com origem em diversos fatores, que atuam de forma isolada ou em conjunto, e que poderão estar presentes no funcionamento do radar situado em Cruz do Leão. Seguem-se os fatores mais relevantes para a análise dos dados, a interpretação dos resultados e o desenvolvimento do presente estudo:

1. O volume do impulso do feixe do radar poderá não está completamente preenchido com precipitação homogênea, sendo que este fator será mais importante à medida que a distância ao radar aumenta, visto o volume do impulso aumentar. Este fator é irrelevante para a estimativa da precipitação até uma distância de 100 km (WMO, 2010). Assim, sabendo que os pontos a calibrar pelo radar Cruz do Leão

distam do radar entre cerca de 60 km a 103 km, será expectável que existam estimativas na área em estudo um pouco afetadas por este fator.

2. A distância vertical entre a zona monitorizada pelo radar em Cruz do Leão e as estações udográficas. Considerando o ângulo de funcionamento mínimo e a largura do feixe do radar em Cruz do Leão e as distâncias entre o radar e as estações udográficas - D_u (km), citadas no ponto 1, verifica-se que a sua monitorização sobre os pontos de calibração (udógrafos) é realizada a uma distância vertical, que poderá já ser influenciada pela variabilidade vertical da precipitação. A diferença de altitude a que é monitorizada a precipitação pelo radar é avaliada através da altura central do feixe, H_f (expresso em km), e da largura e altitude do feixe, W (Battan, 1973, cit. por Crosson, *et al.*, 1996) obtidas por:

$$H_f = \frac{1}{2} \frac{D_u^2}{R'} + D_u \tan \gamma \quad (3.14)$$

$$W = D_u \tan \varphi \quad (3.15)$$

sendo, γ o ângulo de elevação do radar e φ a largura ou abertura do feixe, ambos expressos em radianos. R' corresponde ao “raio efetivo da terra”, que depende do raio da terra (R_{terra}) sendo determinado a partir da seguinte expressão (Battan, 1973, cit. por Crosson, *et al.*, 1996):

$$R' = 4 \frac{R_{terra}}{3} \quad (3.16)$$

Ao valor estimado de H_f deverá ser adicionado a altura da antena.

3. A exatidão da estimativa da precipitação através das relações $Z - R$ depende do tipo sinótico responsável pela sua ocorrência, isto é, da utilização da relação $Z - R$ adaptada às características sinóticas dos eventos pluviosos. Caso contrário, a estimativa poderá introduzir erros significativos.
4. A ocorrência de chuva provoca atenuação do sinal recebido (eco) e, consequentemente, uma subestimação da precipitação, especialmente nos comprimentos de onda entre 5 e 3 cm, faixa de comprimento de onda muito próxima daquela em que funciona o radar em Cruz do Leão.
5. A proteção do radar com um radome, geralmente de fibra de vidro, é projetada para causar pouca perda na energia irradiada (atenuação de menos de 1 dB na banda C), mas em caso de chuva intensa este valor poderá ser superior (WMO, 2010).
6. A equação do radar: Há muitas hipóteses na interpretação da potência recebida por radar e, consequentemente, no parâmetro Z através da equação do radar. A não conformidade com as premissas da equação podem levar a erros, expostas na alínea 3.1.1. e associadas à Eq. (3.5).

Os resultados das avaliações efetuadas no âmbito do presente trabalho deverão considerar estes fatores, de forma a melhorar a compreensão e interpretação dos mesmos e, eventualmente, permitir retificar os resultados inicialmente obtidos.

3.3. Comparação entre as precipitações estimadas pelo radar meteorológico em Cruz do Leão (R) e as precipitações registadas na rede udográfica (U)

3.3.1. Análise pontual ao longo do tempo

Com as estimativas de intensidades de precipitação horárias (RAIN1) fornecidas pelo IPMA, I.P., construiu-se uma matriz com uma resolução de cerca de 1 x 1 km² e selecionaram-se as quadrículas da matriz na qual se localizam as estações udográficas da Autoridade Nacional da Água e do IPMA, I.P.. Para cada uma destas quadrículas da matriz fez-se a comparação entre a intensidade de precipitação horária registada na estação udográfica e a estimativa de intensidade de precipitação apresentada em RAIN1. Este processo exigiu a interpretação dos ficheiros RAIN1, que foram disponibilizados pelo IPMA, I.P: apenas em formato IRIS da Vaisala (<http://www.vaisala.com/en/products/weatherradars/IRIS/Pages/IRIS.aspx>). Esta interpretação exigiu a consulta de informação específica disponível na internet (ftp://ftp.sigmet.com/outgoing/manuals/IRIS_Programmers_Manual.pdf) e que esquematicamente se ilustra na Fig. 3.16.

sectores	Código Decimal	Código Hexadecimal	Posição relativa	Tamanho		Valor Hexadecimal	Valor Decimal	
	OFFSET DEC	OFFSET HEX	REL OFFSET	SIZE	NAME	VALUE HEX	VALUE DEC	COMMENT
					structure_header (0)			3.2.50
	0	0	0	2	identifier	18	27	ver lista em 3.2.50 -> product_hdr
	2	2	2	2	format version	8	8	
	4	4	4	4	entire struct size	aff00	720640	tamanho do ficheiro
	8	8	8	2	reserved	0	0	
	10	A	10	2	flags: bit0=struct complete	0	0	
					structure_header (1)			3.2.28
	12	C	0	2	identifier	1A	26	ver lista em 3.2.50 -> product_configuration
	14	E	2	2	format version	6	6	
	16	10	4	4	entire struct size	140	320	
	20	14	8	2	reserved	0	0	
	22	16	10	2	flags: bit0=struct complete	0	0	
					product_configuration			(3.2.26)
	24	18	12	2	product type	7	7	RAIN1
	28	1C	16	4	seconds to skip between runs	E10	3600	1 hora
	32	20	20	12	time product generated (UTC)	struct 3.2.80	struct 3.2.80	UTC 11:53:38 2012\06\13 (não interessa, não é dos dados)
	68	44	56	6	spare	0	0	
	74	4A	62	12	name of product config file	char(12)	char(12)	RAIN1 (fornecido pelo IPMA)
	86	56	74	12	name of task used to gen. Data	char(12)	char(12)	REFLECTVOL_A (fornecido pelo IPMA)
	98	62	86	2				
	100	64	88	4	X scale cm/pixel	185a5	99749	equivalente a 997.49 m por célula
	104	68	92	4	Y scale cm/pixel	185a5	99749	equivalente a 997.49 m por célula
	108	6C	96	4	Z scale cm/pixel	0	0	
	112	70	100	4	X direction size of data array	258	600	número de células em X
	116	74	104	4	Y direction size of data array	258	600	número de células em Y
	120	78	108	4	Z direction size of data array	1	1	número de células em Z
	124	7C	112	4	X location of radar in data array	493e0	300000	célula 300
	128	80	116	4	Y location of radar in data array	493e0	300000	célula 300
	132	84	120	4	Z location of radar in data array	0	0	
	142	8E	130	2	Data type generated	25	37	DB_FLIQUID2
	144	90	132	12	Name of projection used			vazio
	156	9C	144	2	Data type used for input	2	2	DB_DBZ (Clutter Corrected H reflectivity (1 byte))
	158	9E	146	1	Projection type code	0	0	Azimuthal equidistant
	164	A4	152	4	Z/R relationship constant in 1/1000	30d40	200000	200 (relação)
	168	A8	156	4	Z/R relationship exponent in 1/1000	640	1600	1,6 (relação)
	172	AC	160	2	X direction smoother in 1/100 of km	64	100	1
	174	AE	162	2	Y direction smoother in 1/100 of km	64	100	1
	284	11C	272	48	spare			
					product_end			
	332	14C	0	16	site name	char(16)	char(16)	portugal_disp1
	348	15C	16	8	IRIS version where product was made	char(8)	char(8)	8,11 (formato IRIS)
	356	164	24	8	IRIS version where ingest data came from	char(8)	char(8)	8,1
	364	16C	32	12	Time of oldest input ingest file	struct 3.2.80	struct 3.2.80	time UTC 17:28 2006\10\02
	376	178	44	28	spare			
	406	196	74	16	hardware name where ingest data came from	char(16)	char(16)	portugal_lisboa
	422	1A6	90	16	site name where ingest data came from	char(16)	char(16)	portugal_lisboa
	440	188	108	4	latitude of center (binary angle)	1bc8ee7a	466153082	39,07249996
	444	18C	112	4	longitude of center (binary angle)	fa07075c	4194764636	-8,398889937
	448	1C0	116	2	Ground height relative to sea level (m)	bc	188	
	452	1C4	120	4	PRF in Hertz	16d	365	
	502	1F6	170	2	Number of ingest files used to make this	6	6	media 6 amostragens? (10/10 min)
	572	23C	240	4	Latitude of projection reference	1bc8ee7a	466153082	39,07249996
	576	240	244	4	Longitude of projection reference	fa07075c	4194764636	-8,398889937

Figura 3.16 – Esquema de interpretação dos ficheiros RAIN1.

Este procedimento foi efetuado considerando as intensidades de precipitação horárias registadas nas estações udográficas (U) selecionadas neste estudo, não incluindo a estação de Lisboa (INAG), uma vez que esta ora não tem registos nos períodos estimados pelo radar (2008, 2003 e parte de 2006), ora não foram disponibilizados dados do radar (2005), ora os dados registados na estação são duvidosos (entre 20 de novembro e 8 de dezembro de 2006 o registo de precipitações foi sempre nulo). Foram comparadas cerca de 14 800 intensidades de precipitação horária registadas nas 28 estações udográficas com as estimadas pelo radar meteorológico em Cruz do Leão e parametrizadas as funções matemáticas que traduzem a relação entre ambas (relação $U - R$). Estas relações permitirão obter uma estimativa de intensidade de precipitação horária sobre a superfície terrestre na região em análise e em locais não monitorizados por estações udográficas.

Constatou-se que a intensidade de precipitação horária mínima estimada pelo radar, não nula, varia entre $0,003 \text{ mm h}^{-1}$ e $0,024 \text{ mm h}^{-1}$, podendo ser estes os valores correspondentes ao sinal mínimo detetável, que foram verificados para distâncias até ao radar meteorológico entre 59,9 km e 102,5 km.

O ajustamento empírico da relação entre as intensidades de precipitação horárias foi efetuado com a função matemática do tipo potencial:

$$\hat{U} = AR^B \quad (3.17)$$

Os parâmetros daquela função, A e B , foram identificados com o programa de otimização não linear “Solver”, do programa informático *Excel*, usando como função objetivo a minimização do somatório do quadrado dos erros. Utilizaram-se os eventos observados em 2003, 2006 e 2008, sempre que existiam os pares de valores a comparar. Não foi imposto qualquer limite mínimo de intensidade de precipitação abaixo do qual se considerasse não existência de precipitação. A curva assim obtida apresenta-se na Fig. 3.17.

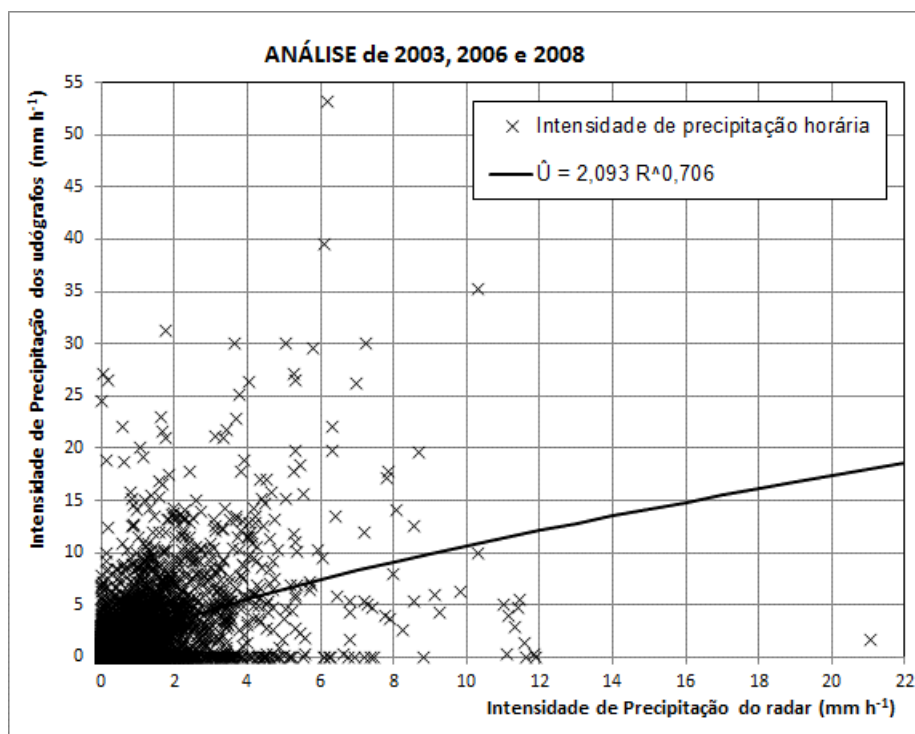


Figura 3.17 – Relação $U-R$ global (2003, 2006 e 2008) para a área metropolitana de Lisboa.

Considerando que em 2006 houve uma alteração na operação do radar meteorológico e uma vez que a relação representada na Fig. 3.17 mostra uma considerável dispersão dos dados de base em relação à função matemática, efetuou-se um ajustamento e respetiva representação gráfica, associada a cada ano (Fig. 3.18).

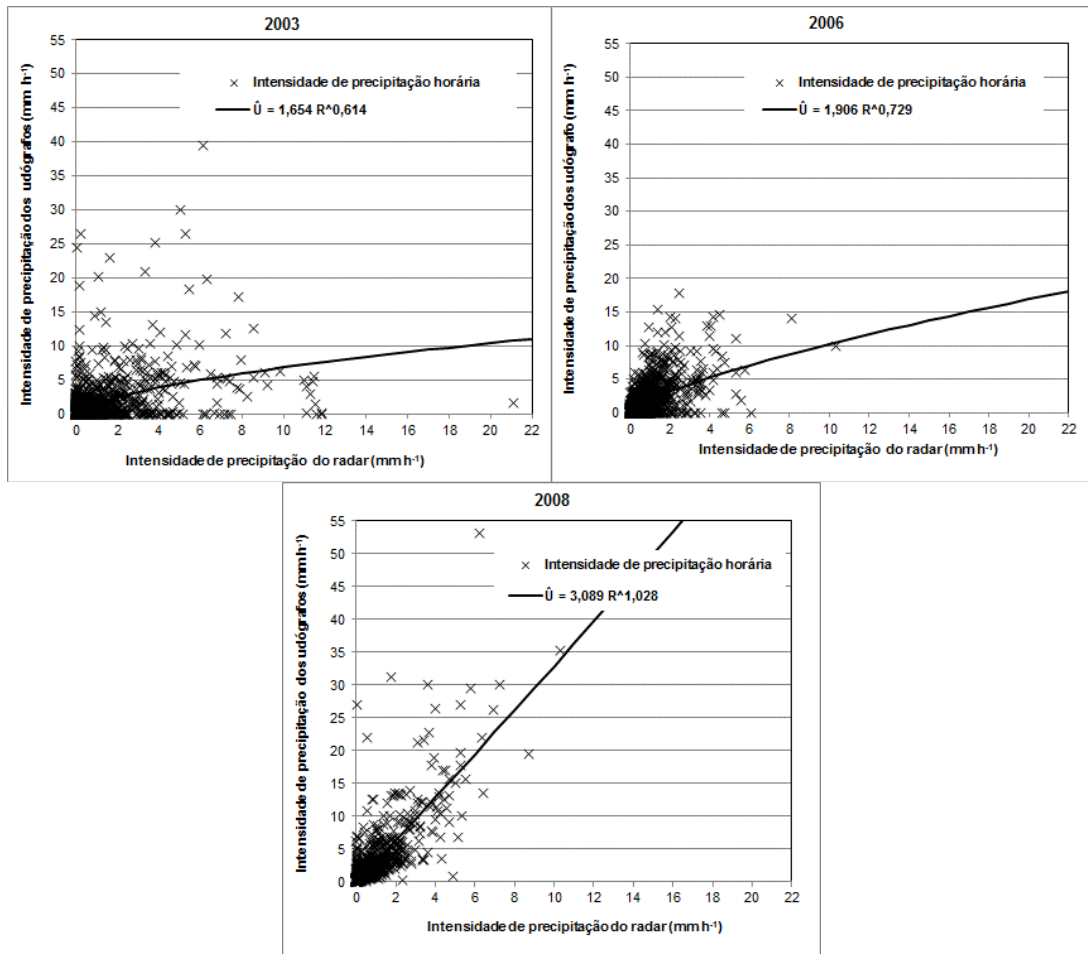


Figura 3.18 – Relação U-R para cada ano (2003, 2006 e 2008, respetivamente) para a área metropolitana de Lisboa.

Constata-se uma diferença significativa entre o ano de 2003 e os anos de 2006/2008. Nos anos de 2006/2008 existe uma tendência para que os valores estimados pelo radar sejam subestimados, sendo que em 2006 não se registaram precipitações tão elevadas como em 2008. Em 2003 existe uma ainda maior subestimação e existem vários valores de precipitação nula registados nos udógrafos associados a precipitações significativas estimadas pelo radar e o contrário, conduzindo a um aumento da já grande dispersão de valores à volta da curva de ajustamento. Verificam-se melhorias na unicidade dos pares de valores, de 2003 para o período 2006/2008, assim como uma diminuição dos pares de valores onde à intensidade nula registada nos udógrafos correspondem estimativas de precipitação não nula pelo radar (que chegam a atingir valores de 12 mm h^{-1} em 2003). Face ao exposto, nota-se que as alterações na operabilidade do radar conduziram a melhorias na relação $U - R$, com impacto nas estimativas da intensidade de precipitação horária.

Neste contexto, foi recalculada a relação $U - R$ global sem considerar o ano de 2003, o que aliás descreve a situação mais atual de operação do radar meteorológico em Cruz do Leão, contemplando o evento chuvoso de 2008, onde foram registadas as maiores precipitações horárias, superiores a 20 mm h^{-1} (Fig. 3.19).

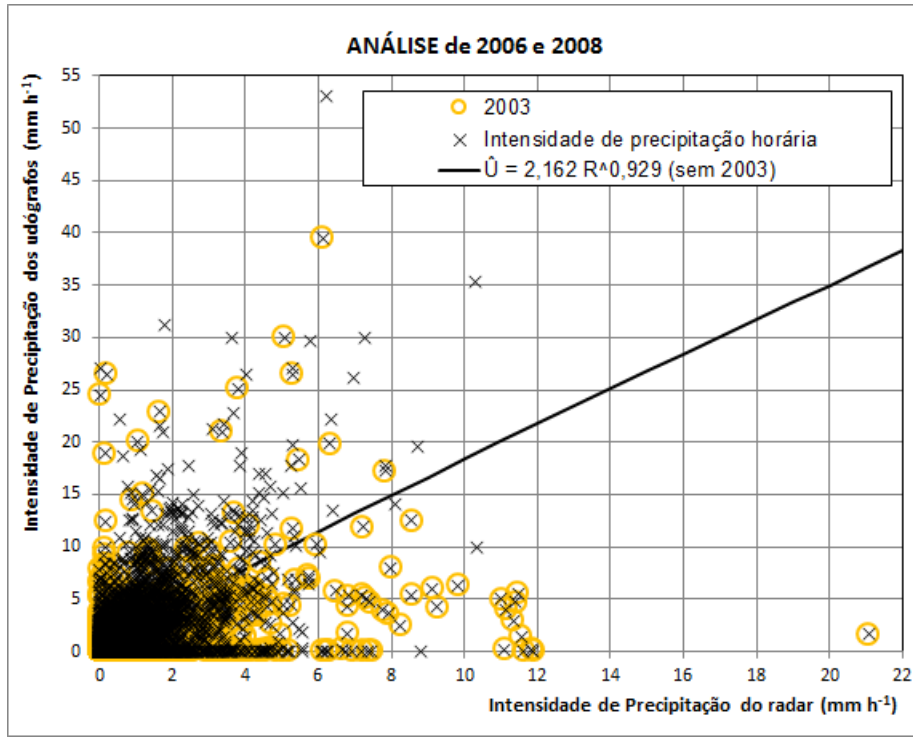


Figura 3.19 – Relação U-R global (2006 e 2008) para a área metropolitana de Lisboa.

A qualidade dos ajustamentos às diferentes funções matemáticas parametrizadas foi avaliada através da determinação de duas estatísticas, a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio - REQM (Eq. 3.18) e o Erro Relativo Médio – ERM (Eq. 3.19), expressos por:

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N_t} (U_t - \hat{U}_t)^2}{N_t}} \quad (3.18)$$

$$ERM = \frac{\sum_{t=1}^{N_t} \left| \frac{U_t - \hat{U}_t}{U_t} \right| \times 100}{N_t} \quad (3.19)$$

onde, U_t é a intensidade de precipitação registada no udógrafo e \hat{U}_t é a intensidade de precipitação estimada através da relação $U - R$, ambas correspondentes ao instante horário t , sendo N_t o número total de instantes horários analisados. Nas análises sobre a área, as intensidades horárias correspondem à média ponderada na bacia hidrográfica ou no conjunto das bacias (alínea 3.3.2.).

Com o objetivo de avaliar a interdependência das variáveis da relação $U - R$ foi determinada a Covariância (Cov) e o coeficiente de correlação (r), cujos valores amostrais são expressos pelas Eqs. (3.20) e (3.21). A Covariância é uma medida do grau de interdependência (ou inter-relação) numérica entre duas variáveis aleatórias (o valor nulo indica que não existe interdependência) e o coeficiente de correlação exprime o grau de associação, mais ou menos elevado, entre duas variáveis aleatórias (quanto mais próximo de um, maior é a relação linear entre as variáveis),

$$Cov = \frac{\sum_{t=1}^{N_t} U_t R_t - \bar{U} \bar{R}}{N_t} \quad (3.20)$$

$$r = \frac{\sum_{t=1}^{N_t} (\hat{U}_t - \bar{\hat{U}})(R_t - \bar{R})}{(N_t - 1) S_{\hat{U}} S_R} \quad (3.21)$$

sendo, $S_{\hat{U}}$ o desvio-padrão da intensidade de precipitação estimada para os udógrafos (Eq. 3.22) e S_R o desvio-padrão da intensidade da precipitação estimada pelo radar (Eq. 3.23), expressos pelos valores amostrais, com correção de viés:

$$S_{\hat{U}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N_t} (\hat{U}_t - \bar{\hat{U}})^2}{(N_t - 1)}} \quad (3.22)$$

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N_t} (R_t - \bar{R})^2}{(N_t - 1)}} \quad (3.23)$$

onde, $\bar{\hat{U}}$ e \bar{R} são a média da intensidade de precipitação estimada para os udógrafos e estimada pelo radar, respetivamente.

A intensidade da precipitação horária registada nos udógrafos foi considerada como a “verdade-do-terreno”. No Quadro 3.6 são apresentados os resultados obtidos para REQM, ERM, r e Cov para as relações $U - R$ apresentadas anteriormente, que permitem determinar a intensidade de precipitação nos udógrafos recorrendo às estimativas do radar meteorológico.

Quadro 3.6 – Valores de raiz quadrada do erro quadrático médio, REQM, erro relativo médio, ERM, coeficiente de correlação, r , e covariância, Cov, associados às relações pontuais $U - R$.

Identificação da relação $U - R$	REQM (mm h ⁻¹)	ERM (%)	Coeficiente de correlação - r (-)	Covariância - Cov (-)
Global (2003, 2006 e 2008)	1,31	64,00	0,571	1,111
Global (2006 e 2008)	2,38	67,85	0,650	1,072
Anual (2008)	4,66	6,63	0,777	5,147
Anual (2006)	0,70	59,76	0,588	0,612
Anual (2003)	6,63	67,32	0,423	1,256

Os valores REQM e ERM, que permitem avaliar a qualidade do ajustamento, evidenciam a melhoria generalizada do ajustamento da relação $U - R$ (2008) e $U - R$ (2006) em comparação com os obtidos para a relação $U - R$ (2003). É de realçar que os valores de REQM e ERM associados à relação $U - R$ (2008) foram obtidos recorrendo a único evento chuvoso, sendo esta relação que apresenta o maior coeficiente de correlação. Esta melhoria não se reflete significativamente nas estatísticas da avaliação dos ajustamentos na relação $U - R_{\text{global}}$ (2003, 2006 e 2008) face à relação $U - R_{\text{global}}$ (2006 e 2008), apesar desta última relação integrar os períodos onde o radar meteorológico funcionou com melhor fiabilidade. Para além das considerações efetuadas anteriormente, a relação $U - R_{\text{global}}$ (2006 e 2008) poderá ser considerada a melhor porque, concomitantemente basear-se no melhor período de funcionamento do radar, inclui a maioria de pares de valores, abrange uma maior amplitude de valores e apresenta a segunda relação com melhor coeficiente de correlação.

Os valores de Cov evidenciam que a maior dependência está associada à relação U-R (2008), valor mais distante de zero, enquanto as relações U-R_{global} (2006 e 2008) e U-R (2008), apresentam mais altos coeficientes de correlação, sendo contudo valores que significam a existência de uma correlação apenas moderada, indiciando a interferência dos fatores anteriormente mencionados na alínea 3.1.1. e no subcapítulo 3.2..

A bibliografia de investigação relacionada com a calibração de radares meteorológicos mostra haver vantagem em efetuar ajustamentos distintos consoante as diversas tipologias das situações sinóticas responsáveis pelos fenómenos chuvosos. Com este propósito, definiram-se três tipologias sinóticas (subcapítulo 2.5.) que foram associadas aos diversos períodos temporais (**Anexo 7**) e para os quais foram determinadas as relações $U - R$ expressas pela Eq. (3.17) (Fig. 3.19). Foi também determinada uma relação $U - R$ tipo 2 – melhorada, que resulta da fusão dos eventos chuvosos do tipo 2 e dos três eventos do tipo 3 (situações também depressionárias, mas complexas), tendo sido excluídos os eventos chuvosos classificados como do tipo 2 ocorridos em 2003, permitindo incorporar apenas dados obtidos com o atual processo de funcionamento do radar (Fig. 3.20).

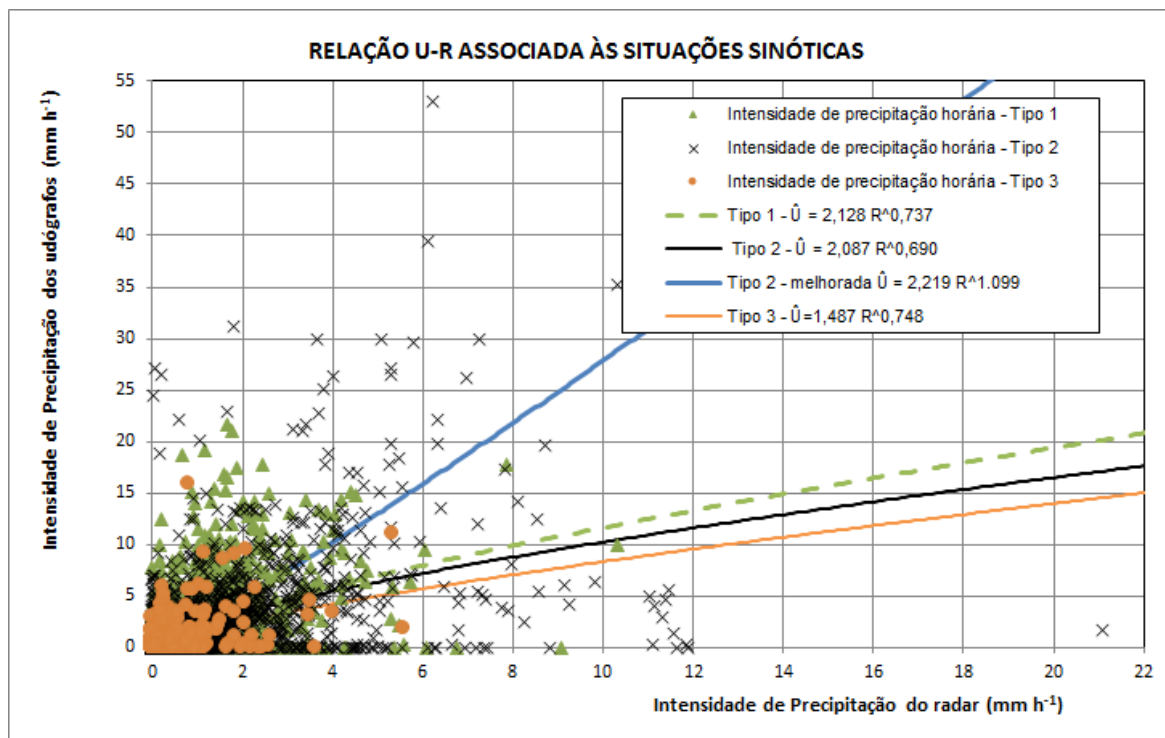


Figura 3.20 – Relação $U - R$ para as quatro tipologias sinóticas (1, 2, 3 e 2 melhorada) para a área metropolitana de Lisboa.

Os resultados da avaliação da qualidade dos ajustamentos obtidos para os dois tipos sinóticos, bem como os valores de coeficientes de correlação e Covariância, estão indicados no Quadro 3.7. Os resultados obtidos não evidenciam melhorias em comparação com as relações globais, existindo apenas pequenas melhorias no coeficiente de correlação na relação U-R Tipo 2 melhorada.

Quadro 3.7 – Valores de raiz quadrada do erro quadrático médio, REQM, erro relativo médio, ERM, coeficiente de correlação, r , e covariância, Cov, associados às relações pontuais $U - R$ Tipo 1 e Tipo 2 melhorada.

Identificação da relação U-R	REQM (mm h ⁻¹)	ERM (%)	Coeficiente de correlação – r (-)	Covariância (-)
Relação U-R Tipo 1	3,11	82,91	0,590	0,813
Relação U-R Tipo 2 melhorada	24,15	148,57	0,697	1,254

Para além destas avaliações, parametrizaram-se as relações $U - R_{\text{estação}}$ para cada uma das 28 estações udográficas, bem como as respetivas estatísticas que permitem avaliar a qualidade dos ajustamentos (REQM, ERM, r e Cov).

Nas Figs. 3.21 e 3.22 representam-se exemplos de doze relações $U - R_{\text{estação}}$, agrupadas por estações exploradas pela Autoridade Nacional da Água e pelo IPMA, I.P., respetivamente, estando as restantes apresentadas no **Anexo 10**.

No Quadro 3.8 apresentam-se as equações e estatísticas de ajustamento obtidas para todas as estações. Note-se que, considerando a alteração da operacionalidade do radar em 2006, procedeu-se também à determinação das relações $U - R_{\text{estação}}$ retirando os registos de 2003. Naturalmente, para as estações que não tinham registos associados a 2003 não há alterações a assinalar. É de realçar que existem algumas estações geridas pelo IPMA, I.P., para as quais não foi possível efetuar o ajustamento de uma relação $U - R_{\text{estação}}$ retirando os registos de 2003. Contudo, para a estação do Barreiro, mesmo com a atribuição destes valores iniciais, foram obtidas constantes negativas que inviabilizaram a determinação da sua relação $U - R_{\text{estação}}$.

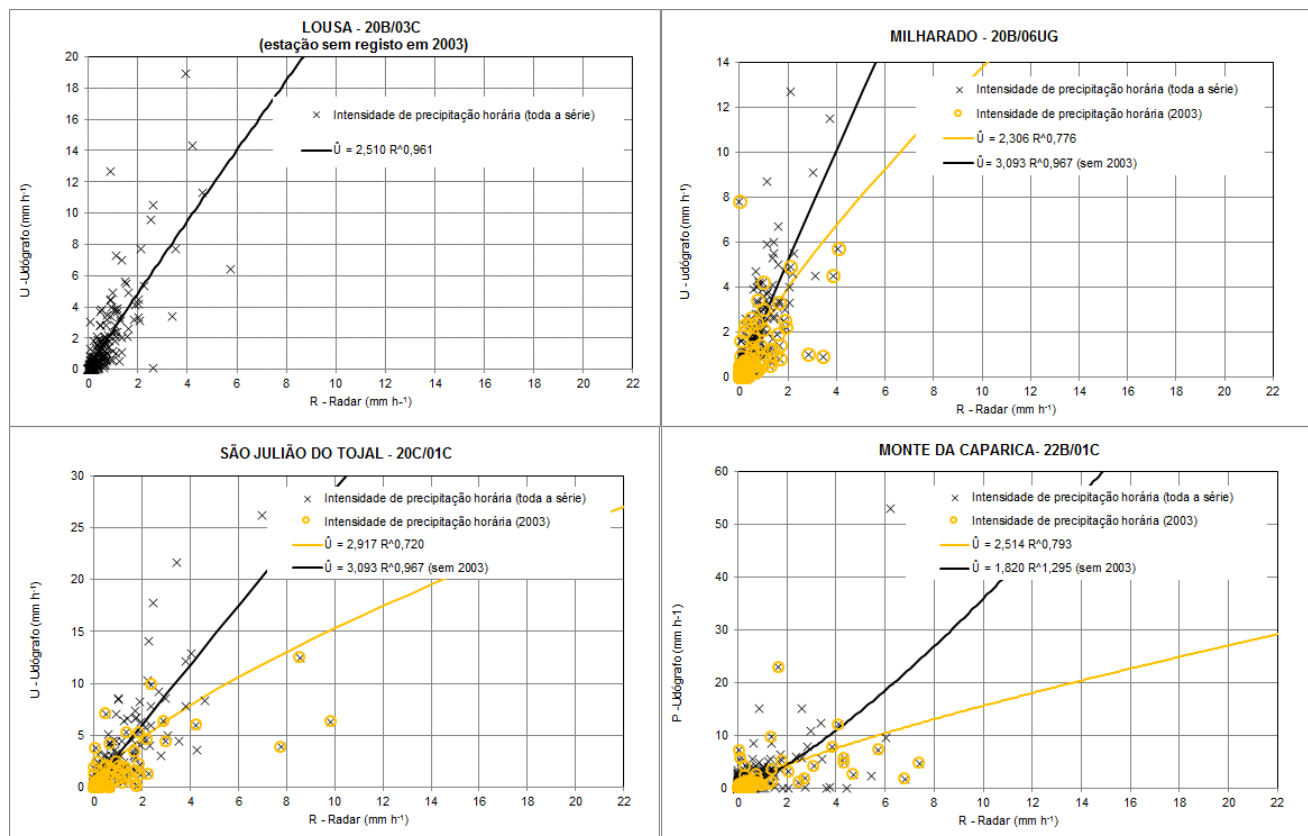
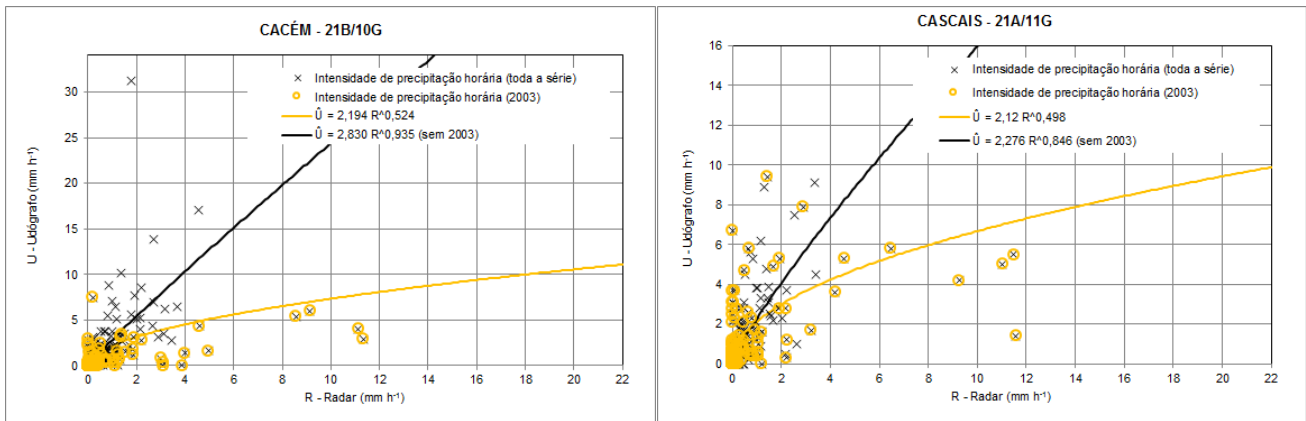
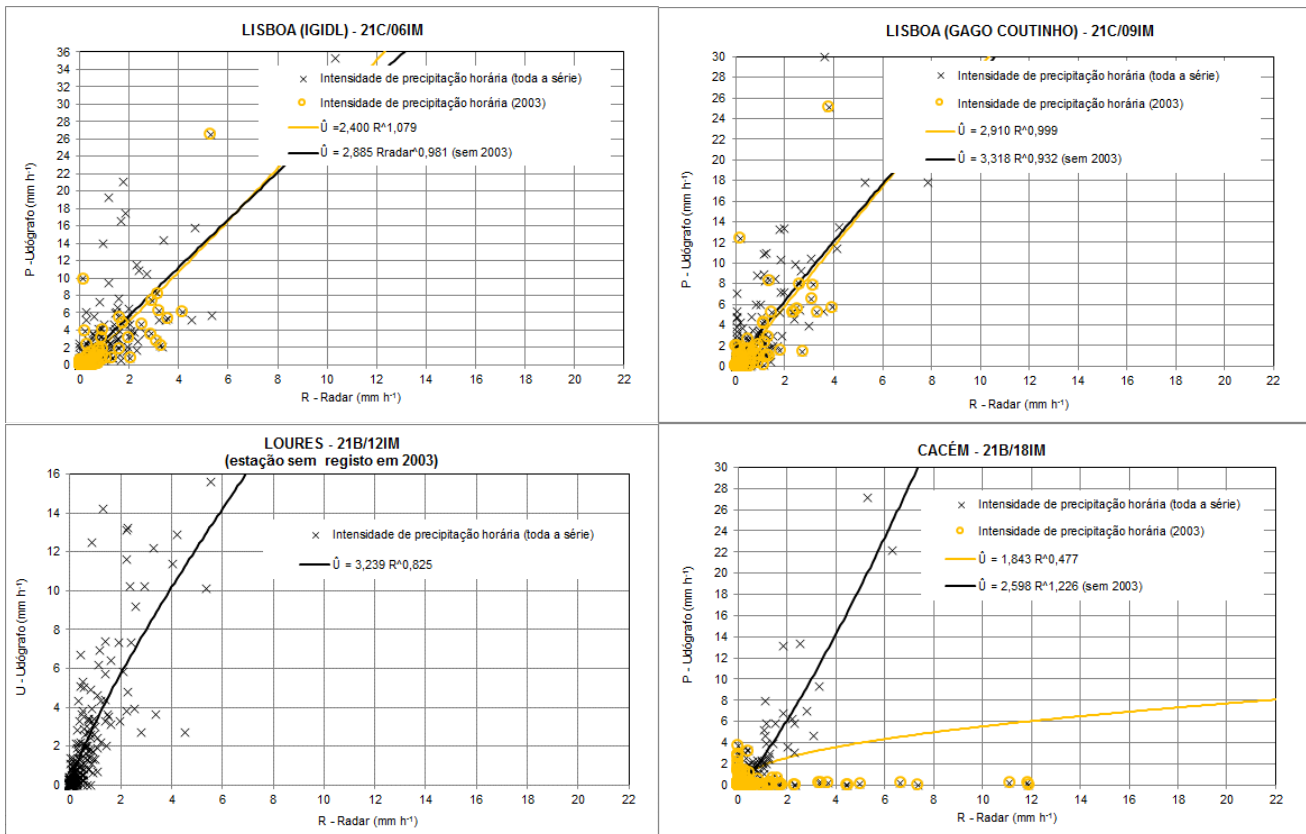


Figura 3.21 – Relação $U - R_{\text{estação}}$ para 6 estações de monitorização da Agência Portuguesa do Ambiente (continua).

Figura 3.21 – Relação U - R_{estação} para 6 estações de monitorização da Agência Portuguesa do Ambiente (continuação).

Os valores apresentados no Quadro 3.8 mostram que os ajustamentos $U - R_{\text{estação}}$ associados às estações do IPMA, I.P., são geralmente de menor qualidade, talvez devido ao número excessivo de pares de valores com intensidade de precipitação nula no udógrafo e estimativa do radar de intensidade de precipitação diferente de zero. Esta situação, que é bastante mais frequentes nas estações geridas pelo IPMA, I.P., localizadas em zonas urbanas, poderá estar relacionada com deficiências no funcionamento destes udógrafos, com a eventual interceção da precipitação medida nestes udógrafos ou com a existência de contaminantes persistentes à monitorização do radar, condicionando a determinação da relação U-R_{estação}. Este fenómeno está bastante bem caracterizado nos gráficos associados às estações do Cacém: registam-se, nos mesmos instantes temporais, intensidades de precipitação nulas no udógrafo do IPMA, I.P. não nulas no udógrafo da APA, I.P. ambas associadas a estimativas do radar de intensidade de precipitação não nulas (registos de 2003).

Figura 3.22 – Relação U-R_{estação} para 6 estações de monitorização do IPMA, I.P. (continua).

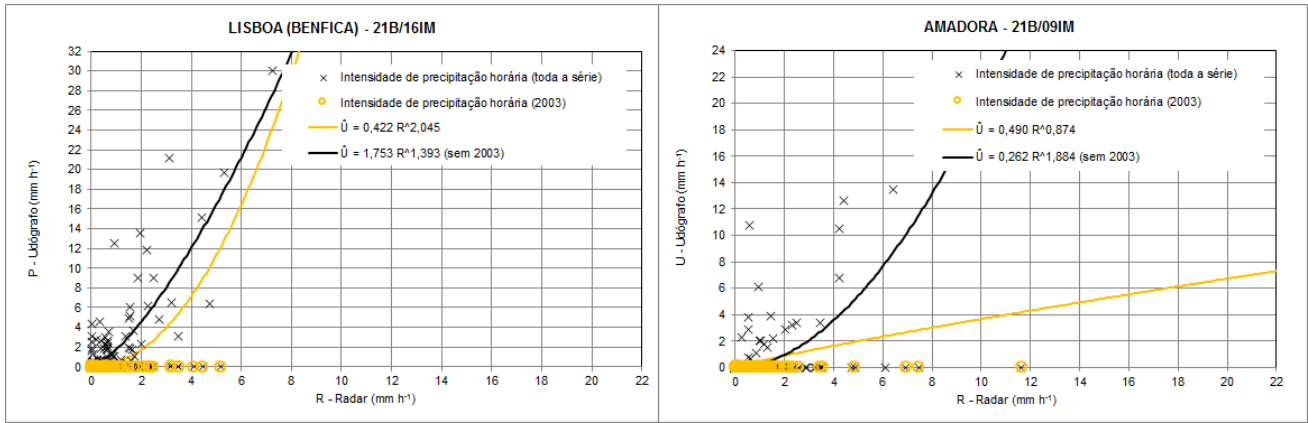


Figura 3.22 – Relação $U-R_{\text{estação}}$ para 6 estações de monitorização do IPMA, I.P. (continuação).

As relações $U-R_{\text{estação}}$ associadas às estações Barragem rio da Mula, Arranhó, Linhó e Cabo Raso (Farol) apresentam globalmente melhores resultados nas estatísticas de avaliação do ajustamento, sendo de realçar que as mesmas praticamente não foram obtidas com os dados de 2003 (Quadro 3.8). As estações de monitorização cujos códigos terminam em IM são aquelas cujo funcionamento é da responsabilidade do IPMA, I.P.. Os piores resultados do ajustamento estão associados às estações da Amadora, Lisboa (Benfica), Lisboa (Baixa), Lisboa (Estefânia), Lisboa (Alvalade) e Cacém (IPMA, I.P.). Portanto, em termos gerais, os piores resultados nos parâmetros de ajustamento (REQM e ERM) das relações $U-R_{\text{estação}}$ estão associados às estações de monitorização da responsabilidade do IPMA, I.P. (Fig. 3.23).

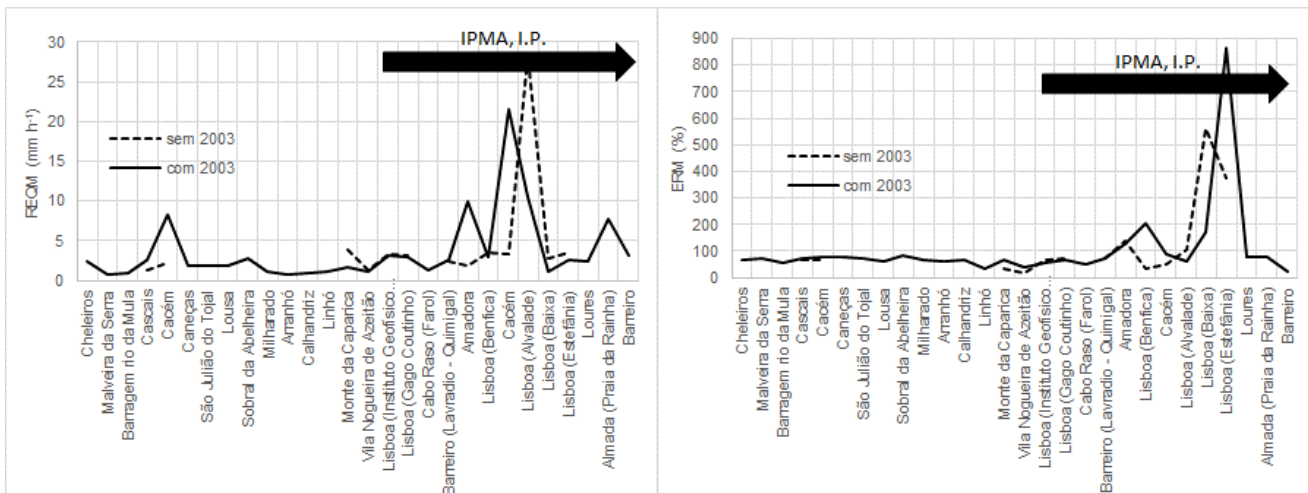


Figura 3.23 – Resultados dos parâmetros de avaliação dos ajustamentos das relações $U-R_{\text{estação}}$.

Quadro 3.8 – Constantes A e B das relações $U - R_{\text{estação}}$ de monitorização e estatísticas de avaliação do seu ajustamento, para as sete bacias hidrográficas na área metropolitana de Lisboa (em que REQM = raiz quadrada do erro quadrático médio e ERM = erro relativo médio).

Estação udográfica - SNIRH	Código - SNIRH	A	B	REQM (mmh ⁻¹)	ERM (%)
Cheleiros	20B/04GC	3,335	1,033	2,43	68,63
Malveira da Serra	21A/12G	2,195	0,605	0,80	71,98
Barragem rio da Mula	21A/10G	1,901	0,829	0,88	55,97
Cascais	21A/11G	2,120	0,498	2,52	74,91
Cascais (sem 2003)		2,276	0,846	1,21	64,57
Cacém	21B/10G	2,194	0,524	8,30	77,62
Cacém (sem 2003)		2,830	0,935	2,22	67,85
Caneças	21B/11UG	3,116	0,736	1,91	78,57
Lisboa (INAG)	21C/02G	-	-	-	-
São Julião do Tojal	20C/01C	2,917	0,720	1,78	74,99
São Julião do Tojal (sem 2003)		3,093	0,967	2,90	68,91
Lousa	20B/03C	2,510	0,961	1,86	62,02
Sobral da Abelheira	20B/02UG	4,269	0,705	2,68	84,76
Milharado	20B/06UG	2,306	0,776	1,13	65,95
Milharado (sem 2003)		3,093	0,967	1,71	63,80
Arranhó	20C/03G	1,986	0,772	0,74	61,59
Calhandriz	20C/04UG	1,937	0,606	0,91	64,18
Calhandriz (sem 2003)		2,163	0,790	1,11	62,58
Linhó	21A/09G	1,204	1,425	1,16	36,05
Monte da Caparica	22B/01C	2,514	0,793	1,69	67,38
Monte da Caparica (sem 2003)		1,820	1,295	3,92	36,39
Vila Nogueira de Azeitão	22C/02UG	1,632	0,919	1,18	40,60
Vila Nogueira de Azeitão (sem 2003)		1,161	1,113	1,29	14,96
Lisboa (Instituto Geofísico Infante D. Luís)	21C/06IM	2,400	1,079	3,10	54,80
Lisboa (Instituto Geofísico Infante D. Luís) (sem 2003)		2,885	0,981	3,34	66,07
Lisboa (Gago Coutinho)	21C/09IM	2,910	0,999	2,98	65,68
Lisboa (Gago Coutinho) (sem 2003)		3,318	0,932	3,12	72,38
Cabo Raso (Farol)	21A/08IM	1,981	0,963	1,36	51,09
Barreiro (Lavrado - Quimigal)	21C/01IM	2,387	,579	2,57	71,37
Barreiro (Lavrado - Quimigal) (sem 2003)		2,949	0,847	2,31	71,45
Amadora	21B/09IM	0,490	0,874	9,90	129,31
Amadora (sem 2003)		0,262	1,884	1,80	140,78
Lisboa (Benfica)	21B/16IM	0,422	2,045	3,03	201,68
Lisboa (Benfica) (sem 2003)		1,753	1,393	3,42	32,27
Cacém	21B/18IM	1,843	0,477	21,47	91,49
Cacém (sem 2003)		2,598	1,226	3,24	49,82
Lisboa (Alvalade)	21C/11IM	1,267	0,655	10,51	63,64
Lisboa (Alvalade) (sem 2003)		1,562	0,580	28,32	105,90
Lisboa (Baixa)	21C/12IM	0,31	1,635	1,09	168,62
Lisboa (Baixa) (sem 2003)		0,014	3,328	2,84	563,47
Lisboa (Estefânia)	21C/13IM	0,037	2,895	2,60	864,68
Lisboa (Estefânia) sem 2003		0,127	2,278	3,50	376,53
Loures	21B/12IM	3,239	0,825	2,38	75,50
Almada (Praia da Rainha)	22B/01IM	2,046	0,492	7,75	77,66
Almada (Praia da Rainha) (sem 2003)		2,98	0,759	2,15	73,19
Barreiro	22C/01IM	1,469	1,144	3,10	22,27
Barreiro (sem 2003)		Não foi possível determinar			

Pode concluir-se que:

- As relações $U - R_{\text{global}}$, por ano e por tipologia sinótica, independentemente da qualidade do seu ajustamento, indicam que o radar subestima as intensidades de precipitação horárias.
- A relação $U - R_{\text{global}}$ (2006, 2008) não apresenta melhor ajustamento que a $U - R_{\text{global}}$ (2003, 2006, 2008), considerando a avaliação do REQM e do ERM, estando contudo associada a uma melhoria da sua correlação, passando de moderada ($r = 0,57$) a correlação forte ($r = 0,65$), segundo Franzblau (1958, cit. por Pallaoro, et al. 2016), e reflete o processamento que o radar atualmente realiza. A relação $U - R_{\text{global}}$ (2006, 2008), embora não apresente um bom ajustamento, poderá corrigir significativamente a subestimação generalizada efetuada pelo radar, devido à redução do número de pares de valores com intensidade de precipitação não nulas no radar e nulos nos registos udográficos e, simultaneamente, conduzir a que os registos udográficos com maiores intensidades tenham maior peso no ajustamento da relação. Assim, por exemplo, uma intensidade de precipitação horária estimada pelo radar de 20 mm h^{-1} corresponderá na superfície terrestre, por aplicação da relação global proposta (com dados de 2006 e 2008), a 35 mm h^{-1} , em substituição dos 17 mm h^{-1} , que se obtém pelo radar calibrado com 2003, 2006 e 2008.
- As relações $U - R_{\text{tipologia}}$ permitem considerar duas situações sinóticas distintas conduzindo a grandes diferenças nas intensidade de precipitação determinadas consoante o fenómeno é, fundamentalmente, depressionário – tipo 2 (maiores intensidades) ou frontal – tipo 1 (menores intensidades) (Fig. 3.19). Todavia, esta abordagem não produz melhorias significativas em comparação com a relação $U - R_{\text{global}}$ (2006, 2008), pelo que não serão consideradas na simulação hidrológica.
- As relações $U - R_{\text{global}}$ consideram pares de valores, registados em determinadas estações udográficas, que poderão ter dificultado a determinação de uma relação $U - R_{\text{global}}$ com melhor ajustamento (traduzido por melhores resultados globais nos parâmetros REQM, ERM, r e Cov), nomeadamente algumas estações localizadas na cidade de Lisboa exploradas pelo IPMA, I.P. (Fig. 3.21). Nestas estações registaram-se precipitação nulas nos udógrafos a que corresponde a refletividade com potencial de ocorrência de precipitação.
- As relações $U - R_{\text{estação}}$, $U - R_{\text{global}}$ ou $U - R_{\text{tipologia}}$ estimam intensidades de precipitação em caso de ausência de registo udográfico, permitindo obter uma distribuição espacial da precipitação e integrar informação proveniente da monitorização efetuada por diferentes tecnologias.

De realçar o grande número de dados avaliados em comparação com outros estudos no mesmo campo científico, sendo ainda, tanto quanto é do conhecimento da autora, a primeira vez que são avaliados de forma abrangente em Portugal, os dados de intensidade de precipitação obtidos através das refletividades medidas pelo radar meteorológico.

3.3.2. Análise espacial

Considerando a matriz das estimativas de intensidades de precipitação horárias (RAIN1), com uma resolução de célula de cerca de $1 \times 1 \text{ km}^2$, determinou-se para cada hora a média em área da intensidade de precipitação associada a cada uma das sete bacias hidrográficas e da área geográfica correspondente à soma das sete bacias. Estes valores obtiveram-se através da média aritmética das intensidades de precipitação horária das células existentes em cada área em análise.

Os valores médios em área assim obtidos foram comparados com as intensidades de precipitação ponderadas em área, obtidas para as sete bacias hidrográficas e na área resultante da soma de sete bacias hidrográficas, determinadas no capítulo 2 (recorrendo aos dois modelos agregados para determinar a distribuição espacial da precipitação: polígonos de Thiessen e IDW2-6). Esta comparação permitiu determinar oito relações $U - R_{\text{área}}$, tendo sido confrontados cerca de 176 000 dados do radar.

As relações $U - R_{\text{área}}$ determinadas resultaram do ajustamento aos pares de valores da função potencial expressa pela Eq. (3.17), com os respetivos parâmetros estimados recorrendo ao “Solver”, tal como explicado relativamente às relações $U - R$ em 3.3.1. Estas relações apresentam-se na Fig. 3.24, onde se distinguem os valores estimados e observados de 2003 dos restantes anos, assim como as curvas relativas ao total dos dados e com exclusão dos valores de 2003.

Apesar de 2003 estar associado a uma operação do radar diferente da atual e nesse período as intensidades de precipitações horárias apresentarem uma grande dispersão em torno da curva $U - R$, a sua influência nos resultados sobre as médias nas áreas está atenuada, exceto para a bacia hidrográfica correspondente à estação hidrométrica de Quinta das Camilas (a mais pequena bacia hidrográfica analisada).

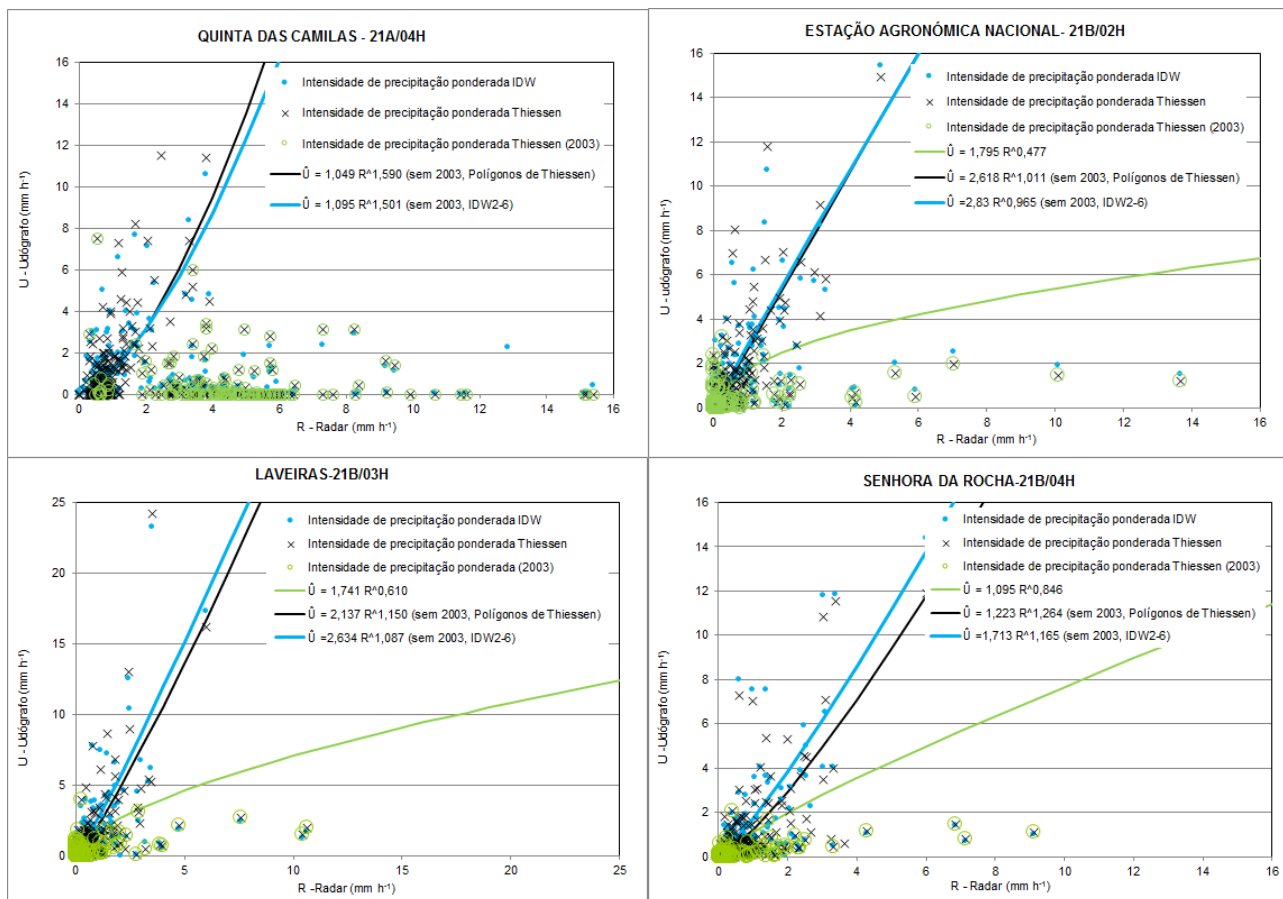


Figura 3.24 – Relação $P - R_{\text{área}}$ para as oito áreas geográficas, considerando os polígonos de Thiessen (com e sem 2003) e IDW2-6 (sem 2003) (continua).

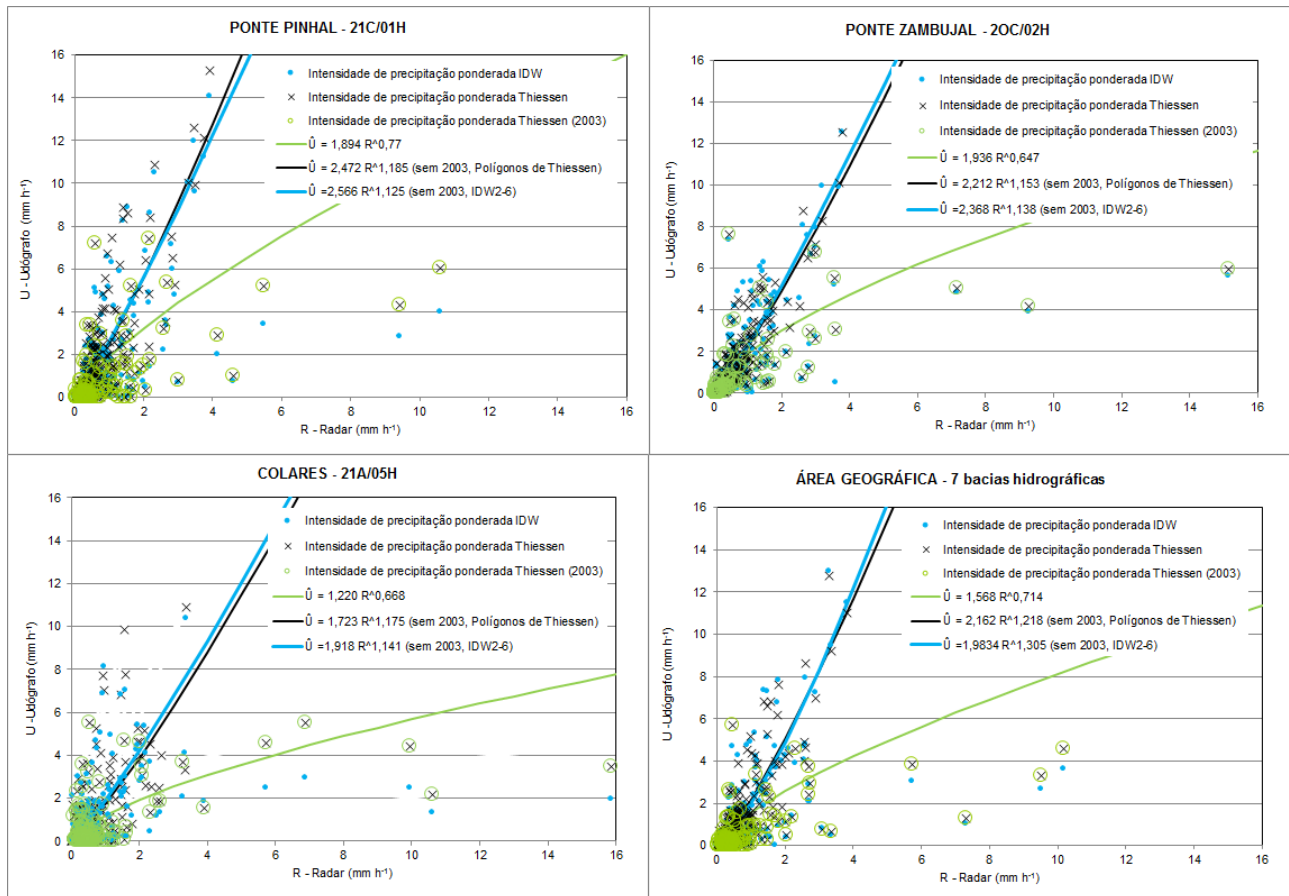


Figura 3.24 – Relação P-R_{área} para as oito áreas geográficas, considerando os polígonos de Thiessen (com e sem 2003) e IDW2-6 (sem 2003) (continuação).

A qualidade dos ajustamentos foi avaliada pelas estatísticas referidas na alínea 3.3.1., e os seus resultados apresentam-se no Quadro 3.9. Com base nestes, pretende-se confrontar as diferentes distribuições espaciais da precipitação obtidas pelos dois métodos, com as distribuições espaciais obtidas com o radar calibrado, o que permitirá escolher a metodologia que melhor descreve a distribuição espacial e temporal da precipitação na zona analisada, a utilizar na ausência de informação do radar.

Quadro 3.9 – Valores de raiz quadrada do erro quadrático médio, REQM e erro relativo médio, ERM, associados às relações $U - R_{\text{área}}$.

Estação hidrométrica SNIRH	Código SNIRH	Número de células (1 x 1 km ²)	REQM (mm h ⁻¹)		ERM (%)	
			Polígonos de Thiessen*	IDW2-6 (sem 2003)	Polígonos de Thiessen*	IDW2-6 (sem 2003)
Quinta das Camilas	21A/04H	9	/ 1,198	1,56	/ 52,69	62,67
Estação Agronómica Nacional	21B/02H	38	12,40 / 1,82	1,68	86,38 / 61,05	68,40
Laveiras	21B/03H	33	3,00 / 1,65	1,92	76,25 / 35,16	51,32
Senhora da Rocha	21B/04H	41	0,59 / 0,93	1,31	36,16 / 37,83	26,03
Ponte Pinhal	21C/01H	81	0,65 / 1,77	1,84	64,19 / 42,83	46,22
Ponte Zambujal	20C/02H	98	0,63 / 1,28	1,53	69,53 / 40,62	44,25
Colares	21A/05H	33	1,54 / 1,01	1,14	57,17 / 47,19	33,30
Área associada às 7 bacias		333	0,56 / 1,75	1,44	52,17 / 41,36	46,00

Legenda: * Com 2003 / Sem 2003.

Face ao exposto, poder-se-á concluir que:

- As relações $U - R_{\text{área}}$ permitem obter as intensidades de precipitação para as oito zonas geográficas, em caso de ausência total de medições à superfície terrestre, isto é, observações udográficas.
- A relação $U - R_{\text{Camilas}}$ foi determinada excluindo o ano 2003, pois esta apresenta valores ponderados estranhos (uma maioria significativa de intensidades de precipitação estimadas pelo radar está compreendida entre 2 e 6 mm h⁻¹, associada a precipitações nulas ou reduzidas à superfície terrestre), podendo ser a consequência da conjugação de ser uma pequena bacia hidrográfica e corresponder ao período temporal onde o procedimento de calibração do radar não terá sido tão fiável (2003).
- O ajustamento das relações $U - R_{\text{área}}$ melhora, em geral, quando não são considerados os valores de 2003, como é possível verificar pela evolução dos parâmetros REQM e ERM, sendo a melhoria mais evidente em termos de ERM.
- As relações $U - R_{\text{área}}$ com melhores resultados correspondem à bacia hidrográfica de Senhora da Rocha e à área do conjunto das sete bacias hidrográficas.
- As relações $U - R_{\text{área}}$ obtidas com os Polígonos de Thiessen ou com os IDW2-6 não diferem significativamente, verificando-se uma tendência para obter os piores resultados nos parâmetros de avaliação do ajustamento quando a estimativa é efetuada através de IDW2-6. Portanto, dever-se-á, utilizar os valores de distribuição espacial da precipitação obtidos pelos Polígonos de Thiessen na modelação dos hidrogramas. Esta determinação recorre a um conjunto de dados ligeiramente diferente da amostra que compara a precipitação média entre Polígonos de Thiessen e IDW2-6 (Quadro 2.12). Mais, a relação $U - R$ é do tipo potencial, enquanto as relações entre as precipitações média espacial é efetuada através de uma equação de reta.

3.4. Discussão dos resultados da calibração

Na bibliografia sobre o radar meteorológico existem inúmeras propostas de relações $Z - R$ cuja aplicabilidade é associada a diversas regiões geográficas e a diferentes condições sinóticas dos fenómenos meteorológicos responsáveis pela ocorrência das precipitações (Quadro 3.10). Por outro lado, as relações expressas pela Eq. (3.6) indicam que a intensificação do processo convectivo tem como consequência o aumento do parâmetro a e a diminuição de b .

Quadro 3.10 – Relações Z - R resultantes da calibração dos sinais recebidos (ecos) do Radar Meteorológico para estimar a Intensidade de precipitação, sendo Z e R expressos, respetivamente, por $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ e em mm h^{-1} .

Nº Identificação	Relação Z-R	Aplicabilidade	Autor ou referência bibliográfica
1	$Z=200R^{1,6}$	Precipitação homogênea para sistemas estratiformes; utilização, geralmente, aceite em caso de ausência de informação e em climas de latitudes médias.	Marshall e Palmer (1948), cit. por Collier (1989) e por Battan (1973); Recomendado pelo Radar Operations Center para utilização nos EUA.
2	$Z=140R^{1,5}$	Suiça. Chuvisco.	Joss, et al. (1970), cit. por Collier (1989) e por Battan (1973).
3	$Z=250R^{1,5}$	Suiça. Precipitação generalizada.	Joss, et al. (1970), cit. por Collier (1989) e por Battan (1973).
4	$Z=500R^{1,5}$	Suiça. Precipitação de tempestade (tipo convectivo).	Joss, et al. (1970), cit. por Collier (1989) e por Battan (1973).
5	$Z=286R^{1,37}$	Tempestades.	Massambani, O. (-).
6	$Z=300R^{1,6}$	Nova Iorque (EUA). Chuvisco, precipitação de tempestade e precipitação estratiforme.	Wilson (1975), cit por Collier (1989).
7	$Z=300R^{1,35}$	Illinois (EUA). Chuvisco e precipitação de tempestade; Todos os sistemas meteorológicos.	Huff e Towery (1978), cit. por Collier (1989); Sekhon e Srivastava (1971), cit. por Figueiredo e Martins (2007).
8	$Z=486R^{1,3}$	Precipitação fina e contínua.	Sauvageot (1982 e 1983), cit. por Fragoço (1996).
9	$Z=31R^{1,71}$	Precipitação orográfica.	Blanchard (1953), cit. por Massambani (-) e cit por Battan (1973).
10	$Z=250R^{1,2}$	Situações tropicais proposta por <i>National Weather Service</i> (NWS), radar WSR-88D (EUA).	Fulton, et al. (1998); Pfaff e Jacobson (1998); Fournier (1999); Raghavan (2003); Massambani, O. (-); Recomendado pelo Radar Operations Center para utilização nos EUA.
11	$Z=486R^{1,37}$	Sistema convectivo.	Jones (1956), cit. por Moreira (2005), cit. por Cluckie e Collier (1991), cit. por Figueiredo e Martins (2007) e cit. por Battan (1973).
12	$Z=300R^{1,4}$	Situação padrão (compromisso entre a precipitação estratiforme e convectiva) proposta por <i>National Weather Service</i> (NWS), radar WSR-88D (EUA).	Woodley, et al. (1975), cit por Collier (1989); Hunter (1996); Crosson, Duchon, Raghavan e Goodman (1996); Pfaff e Jacobson (1998); Fulton, et al. (1998); YANG (2002), cit. por Gonçalves, Barros e Palos (2006); Raghavan (2003); Rose e Troutman (-); Massambani, O. (-); Recomendado pelo Radar Operations Center para utilização nos EUA.
13	$Z=378 R^{1,3}$	Sistemas convectivos de verão para a cidade de São Paulo.	Massambani e Rodrigues (1988), cit. por Gonçalves, Barros e Palos (2006).
14	$Z=284 R^{1,47}$		Hopper, S. E., Illingworth, A. J., Caylor, I. J. cit. por Cluckie e Collier (1991).
15	$Z=400R^{1,3}$	Sistemas convectivos.	Austin (1987), cit. por Almeida e França (2002).
15A	$Z=187 R^{1,27}$	Sistemas convectivos.	Seliga, et al. (1981), cit. por Collier (1989).
16	$Z=315 R^{1,20}$	Todos os sistemas meteorológicos.	Tokay_1 (1996), cit. por Figueiredo e Martins (2007).
17	$Z=139 R^{1,43}$	Sistemas convectivos.	Tokay_2 (1996), cit. por Figueiredo e Martins (2007).
18	$Z=367 R^{1,30}$	Sistema estratiformes.	Tokay_3 (1996), cit. por Figueiredo e Martins (2007).
19	$Z=236 R^{1,26}$		Antonio, M. A. (1998), cit. por Figueiredo e Martins (2007).
20	$Z=378 R^{1,34}$	Cidade de São Paulo	Morales (1991).
21	$Z=130 R^{2,00}$	Precipitação estratiforme de inverno e orográfica na zona Este-EUA	Chilson (2008); Recomendado pelo Radar Operations Center para utilização nos EUA.
22	$Z=75 R^{2,00}$	Precipitação estratiforme de inverno e orográfica na zona oeste-EUA	Chilson (2008); Recomendado pelo Radar Operations Center para utilização nos EUA.
23	$Z=300 R^{1,50}$	Suiça todo o tipo de fenómeno chuvoso.	Raghavan (2003).
24	$Z = 650R^{1,36}$	Para todo tipo de fenómenos chuvosos, mas, apenas, válido até o alcance de 156 km.	Calheiros e Zawadzki (1987).

Sabendo que a estimativa da intensidade da precipitação horária estimada pelo radar em Cruz do Leão recorreu à relação Z - R de Marshall e Palmer (1948), algumas das relações U - R obtidas no decorrer deste estudo foram convertidas em Z - R (Quadro 3.11), de acordo com o procedimento seguinte:

$$\hat{U} = AR^B \quad (3.24)$$

$$R = \left(\frac{\hat{U}}{A}\right)^{\frac{1}{B}} \quad (3.25)$$

$$R = 200 \left[\left(\frac{\hat{U}}{A}\right)^{\frac{1}{B}} \right]^{1,6} \quad (3.26)$$

Quadro 3.11 – Algumas relações $Z - R$ obtidas neste estudo.

Relação $Z-R$	Aplicabilidade das relações $Z - R$
$Z = 53,00R^{1,722}$	Global (2006 e 2008)
$Z = 38,82R^{2,171}$	Tipo 1
$Z = 62,67R^{1,456}$	Tipo 2 - melhorado
$Z = 72,64R^{1,314}$	Área Geográfica definida pelas 7 bacias hidrográficas (sem 2003, com Polígonos de Thiessen)
$Z = 66,46R^{1,388}$	Área Geográfica correspondente à bacia hidrográfica definida na estação de Ponte Zambujal (maior bacia) (sem 2003, com Polígonos de Thiessen)
$Z = 190,60R^{1,006}$	Área Geográfica correspondente à bacia hidrográfica definida na estação de Quinta das Camilas (menor bacia) (sem 2003, com Polígonos de Thiessen)

Na Fig. 3.25 representam-se as várias relações $Z - R$ correspondentes aos parâmetros apresentados nos Quadros 3.10. e 3.11, dando-se destaque às propostas por Marshall e Palmer (1948), para a situação padrão indicada por *National Weather Service* (NWS), radar WSR-88D (EUA), para a precipitação generalizada proposta por Joss, *et al.* (1970) e a algumas das obtidas no presente estudo. Considerando a amplitude da refletividade medida pelo radar, verificou-se que para a máxima intensidade de precipitação estimada (150 mm h^{-1}) a variação da refletividade é de cerca de 20 dBZ, sendo a refletividade máxima associada à relação indicada com o nº 21 (65 dBZ) e a mínima à relação da Quinta das Camilas (45 dBZ).

A conversão das relações obtidas $Z - R$ em $U - R$ através da Eq. (3.26) pressupõe a existência de uma relação entre a refletividade horária e a estimativa do radar da intensidade de precipitação horária, que resulta da amostragem de 6 valores numa hora, um por cada 10 min, sendo que a soma dos 6 valores de refletividade poderá não corresponder, exatamente, ao total da precipitação estimada (Pseudo-CAPPI para uma altitude constante de 1000 m do radar de Cruz do Leão). Os resultados obtidos considerando a relação global (2006 e 2008) apresentam valores inferiores, com diferenças médias de -3,64 dBZ e desvio-padrão de 0,57 dBZ, em comparação com a relação, genericamente, utilizada para precipitações estratificadas (Marshall e Palmer, 1948).

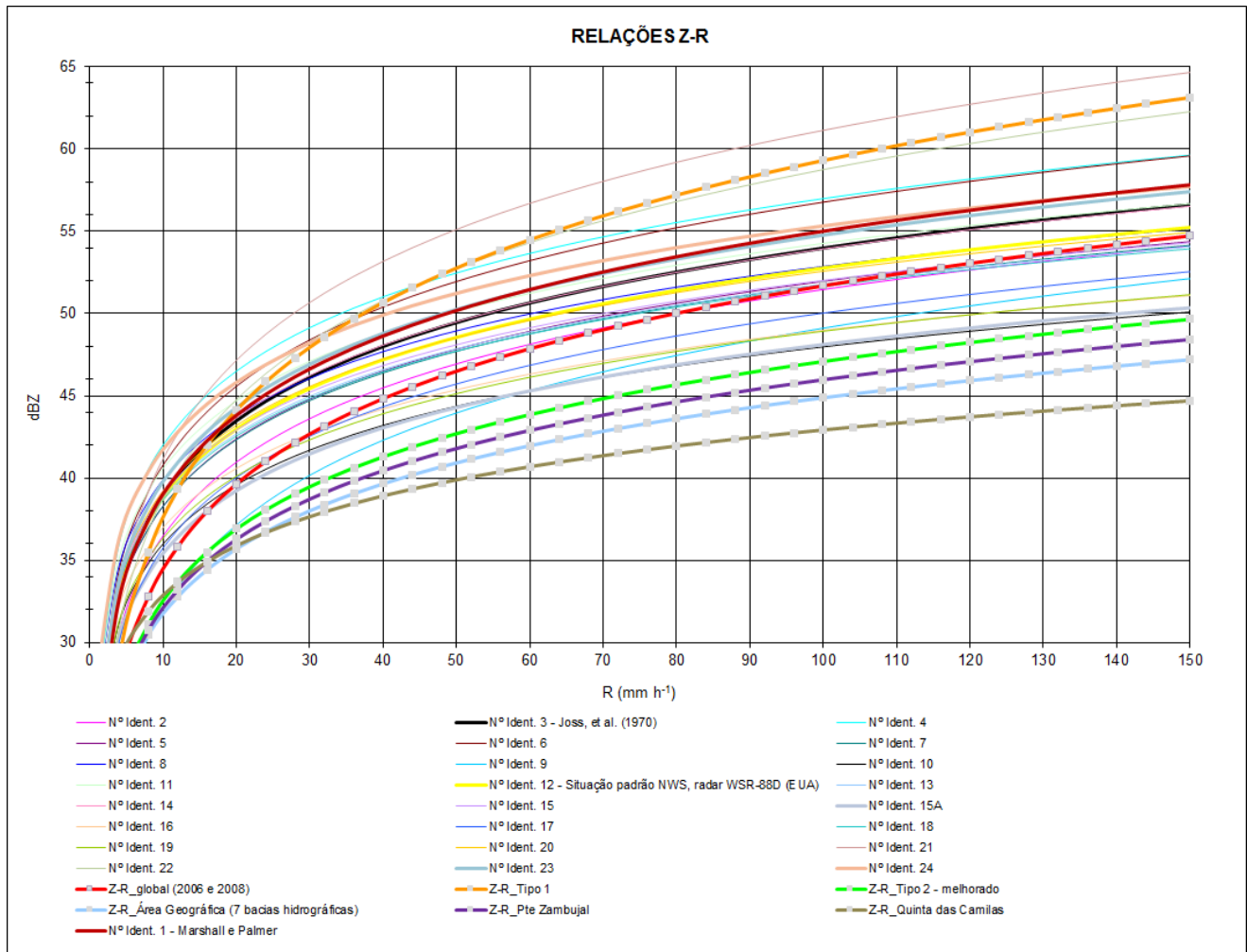


Figura 3.25 – Relações Z - R.

Na Fig. 3.26 apresentam-se as 69 relações Z - R publicadas por Battan (1973) para radares do tipo banda C e as recolhidas e obtidas no presente estudo, as quais são, na sua maioria, publicadas após 1973 (Quadro 3.10). Como se pode observar, evidenciam um padrão semelhante, sendo difícil escolher uma única relação uma vez que a sua obtenção depende de inúmeros fatores, cujos principais foram mencionados na alínea 3.1.1. e no subcapítulo 3.2. Contudo, a comparação entre os dois grupos de relações Z - R permite verificar que foi reduzida a amplitude de refletividades associadas à estimativa de uma intensidade de precipitação de 150 mm h⁻¹, existindo uma melhoria. Esta melhoria é obtida considerando todas as relações resultantes quer da análise pontual como da espacial, sendo mais significativa quando apenas se comparam as relações obtidas por análise pontual.

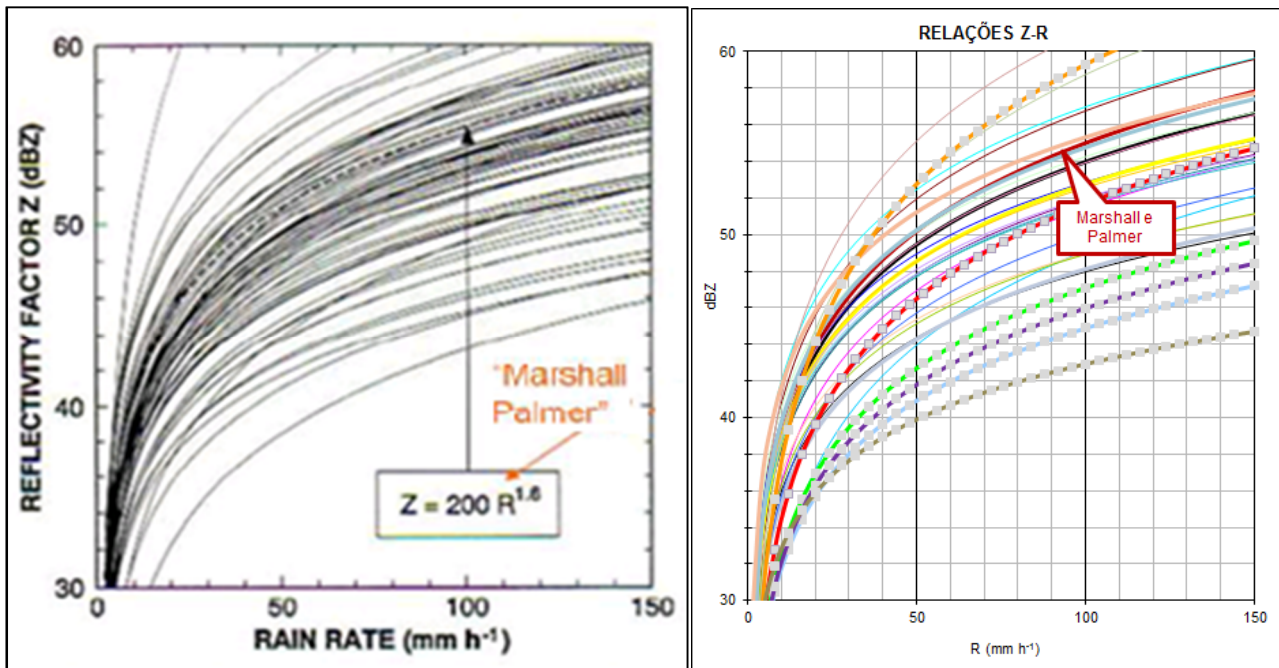


Figura 3.26 – Relações Z - R de Battan (1973) (esquerda) e relações indicadas no Quadro 3.10 (direita).

Na Fig. 3.27 comparam-se as relações Z-R associadas às distâncias de 75 km e 150 km propostas por Ciach, *et al.* (1997), mencionadas no Quadro 3.3, com as obtidas neste estudo, cujas estações udográficas distam do radar de Cruz do Leão entre aproximadamente 60 km (Calhandriz) e 103 km (Cabo Raso), sendo comparáveis e equivalentes as metodologias aplicadas para a sua determinação. A relação Z-R global conduz a resultados próximos da relação proposta por Ciach, *et al.* (1997) para a distância ao radar de 150 km. A Fig 3.27 mostra que os mesmos valores de refletividades correspondem, genericamente, neste estudo e segundo Ciach, *et al.* (1997), a intensidades de precipitação superiores às estimadas recorrendo à relação Z-R de Marshall e Palmer (1948), exceto quando se compara esta com a relação Z-R Tipo 1 (fenómeno sinótico associado a superfícies frontais).

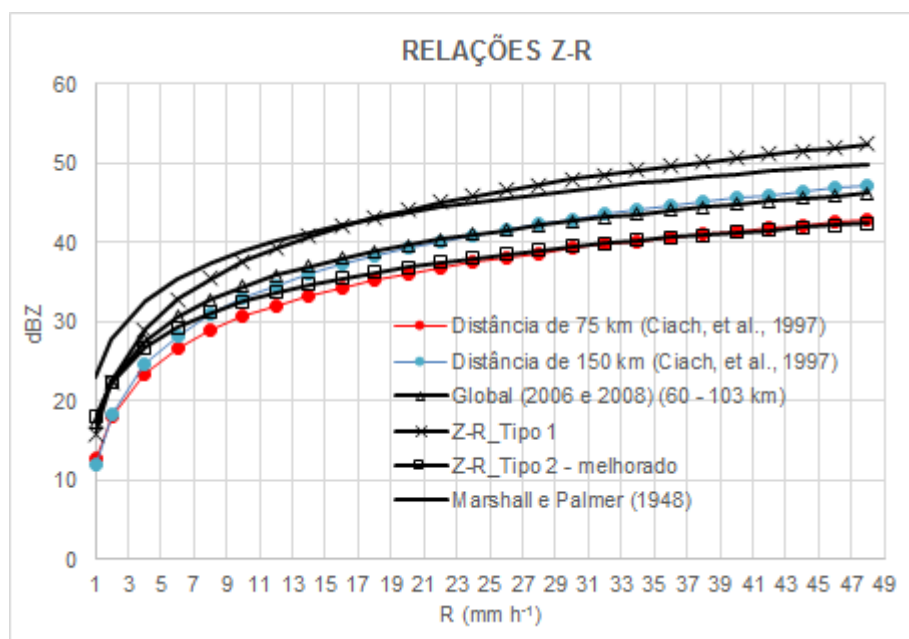


Figura 3.27 – Relações Z - R Global, Tipo 1 e Tipo 2- melhorado, proposto por Ciach, *et al.* (1997) e Marshall e Palmer (1948).

A figura anterior evidencia que a relação de Marshall e Palmer (1948) apresenta um limiar de refletividade associado à estimativa de intensidade de precipitação bastante superior ao determinado no presente estudo e no estudo de Ciach, *et al.* (1997).

Face ao exposto, poder-se-á concluir que:

- A relação $Z - R_{\text{global}}$ estima valores de intensidade de precipitação superiores aos obtidos pela relação $Z - R$ utilizada na operação do radar meteorológico situado em Cruz do Leão (Marshall e Palmer, 1948) e próximo da relação proposta por Ciach, *et al.* (1997), para a relação associada à distância de 150 km. A relação $Z - R_{\text{global}}$ estima intensidades de precipitação inferiores às de Ciach, *et al.* (1997), até a refletividades de cerca de 41 dBZ (24 mm h^{-1}), que corresponde a uma precipitação horária muito inferior aos máximos histórico registados em Portugal (95,7 mm, que equivale a uma intensidade de precipitação de $95,7 \text{ mm h}^{-1}$, em Monchique em 1997) e na zona de Lisboa (63,5 mm, que equivale a uma intensidade de precipitação de $63,5 \text{ mm h}^{-1}$, em Oeiras em 1967).
- A estimativa de uma mesma intensidade de precipitação a partir dos registos dos udógrafos e do radar meteorológico em Cruz do Leão obrigará a alterar a relação $Z - R$ ou, se apropriado e caso seja possível, melhorar o seu funcionamento (e.g., realizando a integração de um maior número de amostras a diferentes altitudes e incrementar número de impulsos por amostra), sendo que esta alteração poderá conduzir à medição de maiores refletividades. As duas opções permitirão ao radar estimar maiores intensidades de precipitação, aproximando estes valores às intensidades de precipitação registadas nos udógrafos.

Apesar das significativas melhorias tecnológicas ocorridas ao longo dos anos (eletrónica e de processamento e análise de dados), que conduzem a melhorias na precisão da monitorização através do radar meteorológico, existem fatores de difícil eliminação e que não são apenas controlados pela melhoria tecnológica e que têm impedido a obtenção de melhores ajustamentos para calibração. Por exemplo, condições meteorológicas não detetadas pelo feixe do radar (camada atmosférica monitorizada), ocorrência de alvos estranhos que interferem com as medições e que poderão estar a condicionar a obtenção de melhores relações $U - R$, a distância entre a localização do radar e das diferentes estações udográficas, para além de outros fatores, igualmente, especificados no capítulo 3.2..

O estudo das relações $Z - R$ a partir de dados de refletividade e de CAPPI ou de PCAAPI, para altitudes mais próximas da superfície, poderão melhorar as estimativas associadas ao radar de Cruz do Leão.

O estudo das relações $Z - R$ deverá ser continuado através da análise de mais períodos chuvosos e a inclusão de dados de outros radares meteorológicos nacionais e, eventualmente, considerar um limite mínimo para realizar o ajustamento das relações $U - R$.

Eventualmente, a monitorização simultânea pelos dois equipamentos de medição de mais acontecimentos pluviosos poderá permitir melhorar a avaliação da relação entre as intensidades de precipitação e sustentar, caso justificável, a incorporação dos erros quantificados pelos REQM e ERM.

4. DETERMINAÇÃO DE HIETOGRAMAS DE PRECIPITAÇÃO EFICAZ E DE HIDROGRAMAS UNITÁRIOS

4.1. Conceitos de base e descrição dos métodos utilizados

4.1.1. Escoamento superficial e seus componentes

A utilização generalizada da modelação hidrológica e hidráulica no domínio dos recursos hídricos (secas, cheias, gestão e planeamento de recursos hídricos ou dimensionamento de obras), assim como a seleção dos modelos a utilizar, está condicionada à obtenção de informação hidrometeorológica com adequada distribuição espacial e discretização temporal, de informação apropriada sobre o tipo e uso do solo e sobre a topografia do sistema.

Embora seja possível construir um modelo hidrológico de base física que simule todos os processos hidrológicos que ocorrem numa bacia hidrográfica, essa opção não é normalmente considerada por exigir uma enorme quantidade de dados e de parâmetros geralmente não disponíveis, e por haver processos que, para uma dada escala temporal e espacial, têm reduzida magnitude, podendo ser desprezados sem afetar significativamente a simulação dos restantes processos.

No atual contexto, correspondente a uma modelação hidrológica não contínua mas de acontecimento, a transformação da precipitação total em escoamento total passa, em primeiro lugar, pela identificação dos principais processos envolvidos na transformação da precipitação total em precipitação útil, nomeadamente, a **interceção**, parcela da precipitação que é retida por elementos existentes à superfície terrestre, naturais ou artificiais (e.g., copas das árvores, manta morta e telhados), sendo posteriormente devolvida para a atmosfera através do processo de evaporação, a **infiltração**, parcela da precipitação que corresponde à passagem da água através da superfície do solo para o seu interior, constituindo a perda mais relevante para a definição do volume e da forma do hidrograma de cheia, e o **armazenamento nas depressões** do solo. Este conjunto de processos poder-se-á designar por perdas (quantidade de água que não contribui para o escoamento superficial).

Processos como a evapotranspiração, a redistribuição de água no solo, a percolação, a recarga do aquífero e o escoamento subterrâneo são considerados nos modelos contínuos, mas normalmente desprezados em modelos de acontecimento, ou por terem pouco significado, como é o caso da evapotranspiração durante eventos chuvosos, ou por se processarem lentamente, tendo pouco impacto durante o período de simulação.

A modelação do escoamento passa por uma prévia caracterização dos seus componentes, que se podem visualizar no hidrograma representado na Fig. 4.1 (adaptado de Lencastre e Franco, 1984) e que se descrevem seguidamente:

- Escoamento de base, também designado por escoamento subterrâneo – resulta da parcela da precipitação que após penetrar no solo atinge o aquífero (recarga do aquífero), representando a contribuição para o escoamento superficial das reservas de água subterrâneas armazenadas nas formações geológicas por onde passa o curso de água.
- Escoamento direto, também, por vezes, designado por escoamento superficial - resulta da precipitação útil, isto é, da parcela da precipitação que, depois de satisfeitos os processos de evaporação, infiltração, e retenção superficial na bacia hidrográfica, chega à rede hidrográfica.

- Escoamento intermédio, também designado por escoamento sub-superficial – resulta da parcela da precipitação que se infiltra, mas que se escoia a pouca profundidade no terreno, devido à existência de substratos impermeáveis mais profundos, ou de um sistema de drenagem artificial enterrado, e que chega aos cursos de água apenas com um ligeiro atraso em relação ao escoamento direto.
- Escoamento resultante da precipitação sobre a rede hidrográfica.

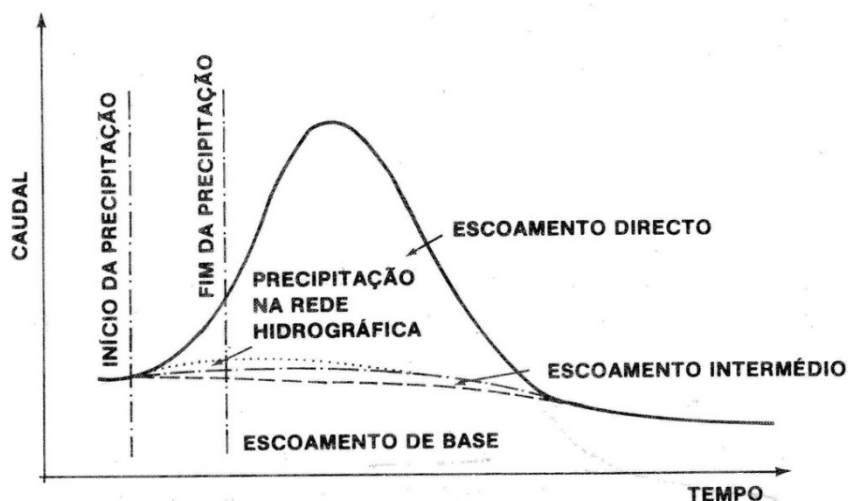


Figura 4.1 – Componentes de um hidrograma (Lencastre e Franco, 1984).

“É frequente, na análise de hidrogramas, considerar-se só o escoamento direto e o escoamento de base, devido à reduzida importância relativa das outras componentes” (Lencastre e Franco, 1984). Neste caso, o escoamento direto inclui o escoamento subsuperficial, correspondendo esta opção a uma simplificação na modelação hidrológica, ao considerar que todo o escoamento direto é produzido pela precipitação útil⁴, evitando a necessidade de caracterizar com detalhe o solo e eventuais estratos.

A modelação do escoamento de base pode efetuar-se considerando este como produzido por um aquífero, na ausência de recarga, ou seja, determinando a curva de esgotamento, também designada por curva de recessão ou de exaurimento, expressa por⁵:

$$Q_{bt} = Q_{b0}e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (4.1)$$

⁴ Para eliminar ambiguidades quanto a estas definições, muitos autores consideram os escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo, como definidos com base física, e o escoamento direto e de base como definidos com base empírica. O escoamento direto seria assim o escoamento rápido, que inclui o escoamento superficial e parte ou todo o escoamento sub-superficial, e o escoamento de base o escoamento lento, que inclui o escoamento subterrâneo e eventualmente uma fração mais lenta do escoamento sub-superficial.

⁵ Esta equação pode obter-se como a solução da equação diferencial que caracteriza o escoamento monodimensional em aquíferos artesianos, em que o movimento vertical e os efeitos capilares são desprezados (Tallaksen, 1995), ou como a libertação de água de um aquífero que se comporta como um reservatório linear (Tallaksen, 1995), com constante temporal do reservatório linear $K = 1/\alpha$ (ver 4.1.3.5).

em que α é o coeficiente de exaurimento (ou de esgotamento, ou constante de recessão) característico do local (T^{-1}), Q_{b0} o caudal de base no instante t_0 , adotado como início do período considerado, Q_{bt} o caudal de base no instante t e e o número de Euler (2,7183). Com esta opção, o escoamento de base não reage à chuvada durante o período de simulação, o que é aceitável num modelo de acontecimento, que tem um período de funcionamento reduzido quando comparado com o tempo necessário para a água percolada constituir recarga do aquífero e dar origem a um aumento do escoamento subterrâneo.

A separação precisa dos componentes do hidrograma é difícil, existindo diversos métodos alternativos, com maior ou menor base física, descritos em qualquer livro de texto de hidrologia (Chow, *et al.* 1988, Lencastre e Franco, 1984, Linsley, *et al.*, 1982, McCuen, 1996, Shaw, 1983). A maior parte destes métodos passa pela identificação de dois pontos do hidrograma de escoamento total: o ponto até ao qual todo o escoamento observado é exclusivamente subterrâneo e o ponto a partir do qual de novo todo o escoamento é exclusivamente subterrâneo, diferenciando-se na forma como unem ambos os pontos na identificação do hidrograma de escoamento de base.

No método adotado neste trabalho (método da linha reta), aqueles dois pontos são identificados numa representação semi-logarítmica do hidrograma de escoamento total, pois, admitindo a validade da Eq. (4.1), a sua logaritmização conduz a uma reta: $\ln Q_{bt} = \ln Q_{b0} - \alpha(t - t_0)$, ou seja, o hidrograma de escoamento subterrâneo é uma reta em coordenadas semi-logarítmicas, com declive igual à constante de exaurimento. O primeiro ponto corresponde ao instante em que o hidrograma de escoamento total deixa de coincidir com o segmento de reta que representa o escoamento subterrâneo (início da subida do hidrograma devido ao escoamento direto) e o segundo ponto ao instante onde deixa de ocorrer escoamento direto e passa de novo a haver coincidência entre o segmento de reta que representa o escoamento subterrâneo e o hidrograma de escoamento total (início da recessão). Finalmente, o hidrograma de escoamento de base corresponde à reta que une aqueles pontos, nas coordenadas originais (Fig. 4.2).

Este método é adequado para a dimensão das bacias hidrográficas em análise (subcapítulo 2.1.) e onde não é expectável a existência de escoamento de base significativo, considerando Shaw (1983) ser um compromisso satisfatório entre simplicidade e consistência dos resultados.

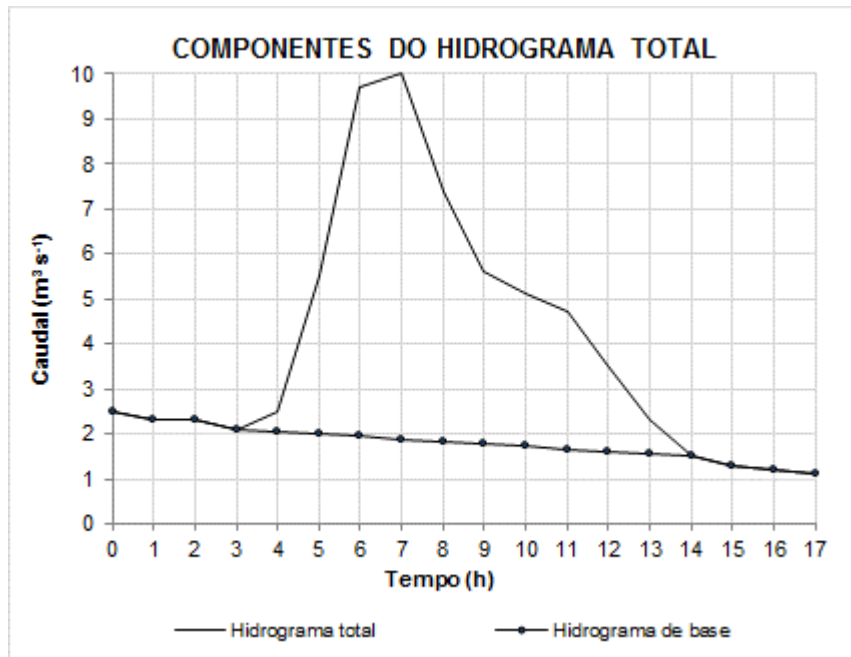


Figura 4.2 – Representação do método para separação dos componentes principais do escoamento total: método da linha reta.

Adicionalmente, obteve-se a constante de exaurimento para cada bacia hidrográfica, estimada através da média das constantes de exaurimento dos vários troços de recessão dos hidrogramas totais registrados, que resultaram da aplicação do método de separação dos componentes escoamento direto e escoamento de base apresentado.

4.1.2. Precipitação útil e Escoamento direto

O hidrograma de escoamento direto é o resultado da precipitação útil, também designada por precipitação eficaz, pelo que o princípio da conservação da massa determina que o volume de precipitação útil sobre a bacia hidrográfica, P_u , tem de ser igual ao volume de escoamento direto, E_d , obtido pela técnica de separação dos componentes do hidrograma de escoamento total acima descrita. É esta igualdade, $P_u = E_d$, que permite calibrar o método de estimativa das perdas.

A taxa de infiltração de água no solo varia rapidamente com o tempo desde o início do acontecimento pluvioso, dependendo em primeiro lugar da intensidade de precipitação útil que atinge o solo e, após a saturação da superfície deste (empoçamento), do tipo de solo (solos arenosos, profundos e agregados, têm maior taxa de infiltração que os solos argilosos e pouco profundos) e da sua cobertura ou revestimento (e.g., uma pastagem apresenta maior taxa de infiltração que um terreno preparado para uma sementeira). O estado de humedecimento do solo aquando do início do acontecimento pluvioso influencia também a taxa de infiltração (quanto mais seco está o solo maior é a taxa de infiltração inicial), bem como o estado de compactação do solo (quanto maior é o estado de compactação menor é a taxa de infiltração).

Existem diversos modelos para estimar explicitamente a taxa de infiltração, deduzidos à escala da coluna de solo e depois generalizados para a escala da bacia, de base física (modelos teóricos) e de base empírica, sendo os mais largamente utilizados os modelos empíricos propostos por Kostiaikov (1932) (Hipólito e Vaz, 2011) e

Horton (1939) (Lencastre e Franco, 1984, Chow, *et al.*, 1988), os semi-empíricos propostos por Green e Ampt (1911), estabelecido a partir da lei de Darcy (Chow, *et al.*, 1988) e Philip (1957), estabelecido a partir da equação diferencial da difusibilidade vertical (Lencastre e Franco, 1984, Chow, *et al.*, 1988) e os de base física, como o proposto por Richards (1931), que decorre da lei de Darcy e da lei da conservação da massa (Hipólito e Vaz, 2011).

Outro tipo de modelos, deduzidos diretamente para a escala da bacia hidrográfica e de natureza empírica, modelam implicitamente a infiltração, incluindo-a no conjunto de perdas, como os métodos do índice Φ e do *Soil Conservation Service*, SCS (subcapítulo 2.1.).

Na perspetiva da modelação das relações precipitação – escoamento, é importante utilizar métodos que assegurem a sincronia entre o aparecimento da precipitação útil e do escoamento direto. Dos vários métodos existentes, escolheram-se os dois métodos empíricos acima referidos, deduzidos à escala da bacia hidrográfica, que agrupam o conjunto das perdas e que asseguram a sincronia acima referida ao considerá-las divididas em dois tipos: as perdas iniciais, que ocorrem antes do aparecimento do escoamento direto, e as restantes perdas que ocorrem após a existência deste. Fisicamente, sabe-se que as perdas iniciais ocorrem no princípio do acontecimento pluvioso, englobando a interceção, a retenção superficial e a infiltração até ao tempo de empoçamento. Só após o empoçamento e depois de preenchida a capacidade de retenção superficial se inicia o processo de escoamento direto, em que a intensidade de precipitação disponível à superfície do solo é superior à taxa de infiltração à capacidade, que decresce exponencialmente, tendendo assintoticamente para o valor da condutividade hidráulica saturada do solo.

Para a calibração destes métodos é importante possuir dados de escoamento, embora para o método do SCS seja possível efetuar uma estimativa dos seus parâmetros com base no tipo e uso do solo da bacia, como apresentado no subcapítulo 2.1., ao contrário do método do índice Φ .

Dada a natureza empírica de ambos os modelos, as perdas iniciais, I_a (mm), não são estimadas com base física, mas como o volume de água correspondente ao hietograma de precipitação total até ao início do período em que começa a haver escoamento direto. As restantes perdas são estimadas de forma específica a cada um dos modelos.

No método do índice Φ ⁶ considera-se que após a satisfação das perdas iniciais (mm) existe uma taxa constante de perdas, igual a Φ (mm h⁻¹). O valor da taxa Φ é estimado iterativamente, assegurando-se que o volume precipitado acima desse valor corresponde ao volume de precipitação útil, identificado após a decomposição do hidrograma de escoamento total, isto é, que $P_u = E_d$ (Fig. 4.3).

⁶ No método do índice ϕ original não existe o conceito de perda inicial, existindo apenas uma taxa constante de perdas durante a ocorrência de precipitação útil. Neste caso há a tendência para se identificar precipitação útil antes do aparecimento do escoamento direto, pelo que não foi aqui considerado e se considerou como método do índice ϕ a adaptação do método original descrita no texto.

Na ausência de dados de escoamento só é possível aplicar este método se os valores de I_a e de Φ tiverem sido estimados previamente com outros acontecimentos. Embora seja possível utilizar um valor médio $\bar{\phi}$ representativo para a bacia, sobretudo se obtido com acontecimentos longos e aplicado também a acontecimentos longos, é mais difícil estimar as perdas iniciais, uma vez que estas dependem das condições de humidade do solo no início da chuvada, não consideradas explicitamente pelo método.

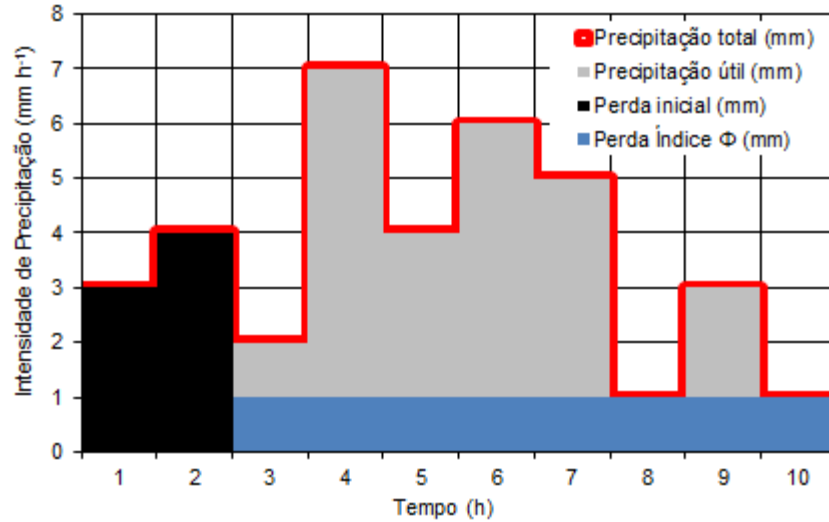


Figura 4.3 – Método do índice Φ .

O método desenvolvido pelo SCS, designado também pelo método do Número de Escoamento (N), foi desenvolvido originalmente para estimar o volume de escoamento direto e o caudal de ponta produzidos por uma chuvada, em bacias rurais, e em menor grau urbanizadas, de pequena e média dimensão (de acordo com Hawkins, *et al.*, 2009, os dados originais correspondiam a bacias com áreas entre 0,1 e 18650 ha). Admitindo que para chuvadas intensas o volume de precipitação é próximo do volume diário este método passou também a ser aplicado com sucesso para intervalos de tempo diários. Embora não tenha sido desenvolvido para esse fim, tem também sido aplicado na obtenção da evolução temporal da precipitação útil ao longo de uma chuvada, o que conduz a uma evolução temporal da infiltração por vezes irrealista, isto é, a intensidade de infiltração pode aumentar num intervalo de tempo em que a intensidade de precipitação tenha sido muito elevada, em vez de decrescer exponencialmente como deveria.

Neste método, a altura acumulada de precipitação útil P_u (mm), é dada pela expressão:

$$P_u = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}, \text{ para } P > I_a \quad (4.3a)$$

em que P é a altura acumulada de precipitação total (mm) e S a retenção ou armazenamento potencial máximo de água no solo da bacia hidrográfica, no início do evento chuvoso (mm). Esta equação, generalizada para intervalos de tempo inferiores à duração da chuvada, toma a forma:

$$P_{ut} = \frac{(P_t - I_a)^2}{P_t - I_a + S}, \text{ para } P_t > I_a \quad (4.3b)$$

em que t representa um índice temporal ($t = 1, 2, \dots, m_p$, sendo m_p o número de períodos de precipitação) e P_{ut} e P_t são as alturas acumuladas de precipitação útil e de precipitação total até ao fim do período t , respetivamente. Naturalmente, se a altura de precipitação acumulada for inferior ao valor das perdas iniciais a precipitação útil é nula.

No caso de haver dados de precipitação e de escoamento conhecem-se os valores de P_u , P e I_a , pelo que a Eq. (4.3a) pode ser resolvida em ordem a S :

$$S = \frac{(P - I_a)^2}{P_u} + I_a - P \quad (4.4)$$

Tal como com o método do índice Φ , na ausência de dados de escoamento só é possível aplicar este método se os valores de I_a e de S tiverem sido estimados previamente com outros acontecimentos. A vantagem do método do SCS sobre o método do índice Φ consiste no facto de o SCS ter encontrado uma forma de estimar aqueles parâmetros a partir do uso do solo, de uma classificação hidrológica do solo e de uma caracterização simplificada da humidade do solo no início da chuvada.

Com base nos dados observados em bacias de pequena dimensão o SCS obteve a relação média:

$$I_a = 0,2S \quad (4.5)$$

No entanto, é importante ter presente que para além desta relação ter sido obtida para bacias com áreas inferiores a 4 ha (Mishra e Singh, 2003), apresentava grande variabilidade e que investigações mais recentes consideram preferível a relação $I_a = 0,05S$, mas cuja opção implica alterar a forma de utilização das tabelas que relacionam S com o tipo e uso de solo (Mishra e Singh, 2003; Hawkins, *et al.*, 2009). Ponce (1989) refere que em pequenas bacias hidrográficas, em áreas moderadamente húmidas ou semiáridas, esta relação pode variar entre 0,0S e 0,26S. Correia (1984a e 1984b), citando SCS, menciona que a Eq. (4.5) constitui um valor médio, sendo que em 50 % dos casos observados os valores de I_a estão compreendidos entre 0,1S e 0,4S, o que corresponde uma dispersão acentuada dos valores observados em torno desta reta. Correia (1984a) afirma que a hipótese traduzida pela Eq. (4.5) não foi verificada de forma inteiramente concludente no nosso país. Morel – Seytoux e Verdin (1980), cit. por Correia (1984a), obtiveram a mesma relação média mas também com uma grande dispersão. Correia (1984b) refere que “se houver qualquer forma mais precisa de calcular I_a para o caso em estudo, parece ser preferível fazê-lo em detrimento da utilização” da Eq. (4.5).

A substituição da expressão para I_a dada pela Eq. (4.5) nas Eqs. (4.3a) e (4.3b) reduz o método do SCS a um modelo com apenas um parâmetro, S :

$$P_u = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \text{ para } P > 0,2S \quad (4.6a)$$

e

$$P_{ut} = \frac{(P_t - 0,2S)^2}{P_t + 0,8S}, \text{ para } P_t > 0,2S \quad (4.6b)$$

O SCS padronizou os valores de S estimados nas suas bacias experimentais, obtendo um parâmetro adimensional, designado de Número de Escoamento, N , compreendido entre zero (bacia com capacidade de infiltração infinita, que não dá origem a escoamento) e cem (bacia impermeável), o qual foi tabelado (SCS, 1972), como já referido, em função do tipo hidrológico do solo e da sua ocupação. Os valores tabelados de N dizem respeito a condições antecedentes de humidade média (AMC_{II}), o que corresponde a uma bacia hidrográfica perto da capacidade de campo, podendo assim também ser designados de N_{II} . No **Anexo 11** apresenta-se o mapa de Portugal com a distribuição espacial dos Números de Escoamento para a situação AMC_{II} , determinados conforme referido no subcapítulo 2.1. e indicado no Quadro 2.1. A relação entre o valor de N e de S (mm) é:

$$S = \frac{25400}{N} - 254 \quad (4.7)$$

As relações expressas pelas Eqs. (4.6a) e (4.7) estão traduzidas na Fig. 4.4.

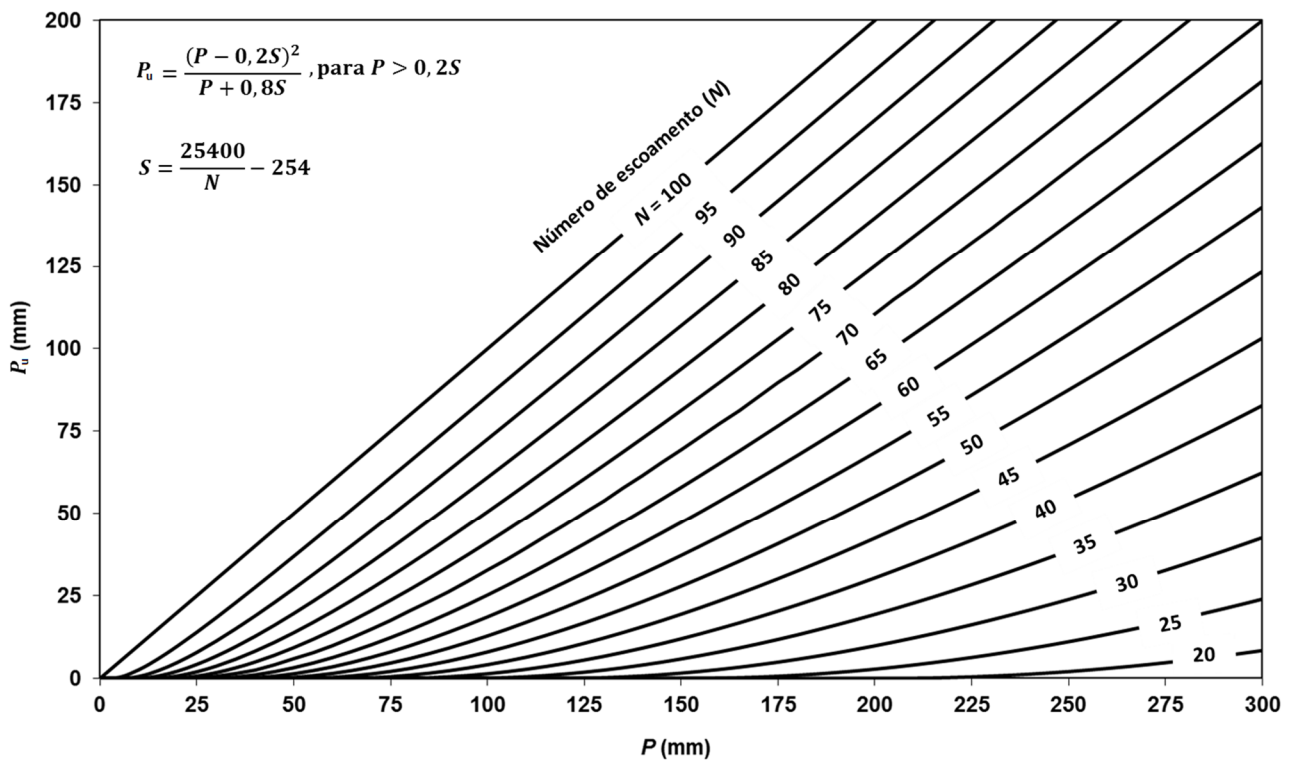


Figura 4.4 - Solução gráfica da relação precipitação total - escoamento direto, Eq. (4.6a) (adaptado de SCS, 1972).

Os valores tabelados de N deverão ser ajustados, no caso de ocorrência de situações mais secas, com o solo próximo do coeficiente de emurchecimento (teor de água no solo com impacto no crescimento das plantas), para as condições antecedentes de humidade seca (AMC_I) ou, mais húmidas, com o solo próximo da saturação, para as condições antecedentes de humidade elevada (AMC_{III}). A conversão do Número de Escoamento proposta pelo SCS (1972 e 1973) é traduzida em Chow, *et al.* (1988) pelas expressões seguintes:

$$N_{III} = \frac{23N_{II}}{10+0,13N_{II}} \quad e \quad N_I = \frac{4,2N_{II}}{10-0,058N_{II}} \quad (4.8)$$

Como com este método não é efetuada a redistribuição de água no solo, o critério sugerido pelo SCS para decidir sobre a condição antecedente de humidade é o apresentado no Quadro 4.1 (deduzido para o oeste do Estados Unidos da América). Segundo o SCS (1972), na ausência de dados de escoamento, as condições de humedecimento do solo médias resultam quando a precipitação acumulada nos cinco dias antecedentes está compreendido entre 12,7 mm a 27,94 mm (estação dormente do crescimento vegetativo) ou entre 35,56 mm a 53,34 mm (estação ativa do crescimento vegetativo).

Quadro 4.1 – Classes das condições antecedentes de humidade (adaptado de SCS, 1972).

Grupo AMC	Precipitação acumulada nos cinco dias antecedentes (mm)	
	Estação inativa (dormente)	Estação ativa (crescimento)
I	Inferior a 12,7	Inferior 35,56
II	12,7 a 27,94	35,56 a 53,34
III	Superior a 27,94	Superior a 53,34

De acordo com Correia (1984), as condições antecedentes de humidade relativas à situação AMC_{III} são as que mais frequentemente se registam em Portugal continental, antes da ocorrência de cheias.

4.1.3. Hidrograma de cheia

4.1.3.1. Enquadramento

Os estudos das cheias recorrem a diversas abordagens metodológicas consoante o seu objetivo, nomeadamente o planeamento, a construção de obras hidráulicas, como descarregadores de cheia de barragens, sistemas de drenagem de águas pluviais, diques, etc., a delimitação de áreas inundáveis associadas às cheias ou o apoio à previsão dos sistemas de aviso e alerta de cheias. Estes fins condicionam o tipo de informação a obter ou a determinar, caudal de ponta de cheia, o hidrograma de cheia ou áreas atingidas e, por conseguinte, a escolha do modelo de simulação a adotar.

No presente estudo pretende-se calibrar o método do Hidrograma Unitário resultante da análise de hidrogramas observados e o de Clark (1945), modelo hidrológico matemático de acontecimento, conceptual, com a verificação do princípio da conservação da massa (conceptual), determinístico, que transforma a precipitação útil estimada ao longo do tempo dos acontecimentos pluviosos (hietograma útil), em caudais de escoamento direto ao longo do tempo (hidrograma direto). Este estudo aplica igualmente os Hidrogramas Unitários Sintéticos de Temez (1978, 1987) e de SCS (1972), classificáveis por modelos hidrológicos matemáticos de acontecimento empíricos. Com a exceção do Hidrograma Unitário de Clark, os modelos hidrológicos aplicados são agregados, uma vez que estão apenas associados às condições médias das áreas das bacias, sub-bacias hidrográficas ou áreas definidas nas secções das estações hidrométricas selecionadas no capítulo 2.

A relação simples que se estabelece entre a precipitação eficaz (ou útil) e o escoamento direto é possível pois os componentes mais complexos (e não lineares) do ciclo hidrológico já foram previamente considerados e removidos (Fig. 4.5).

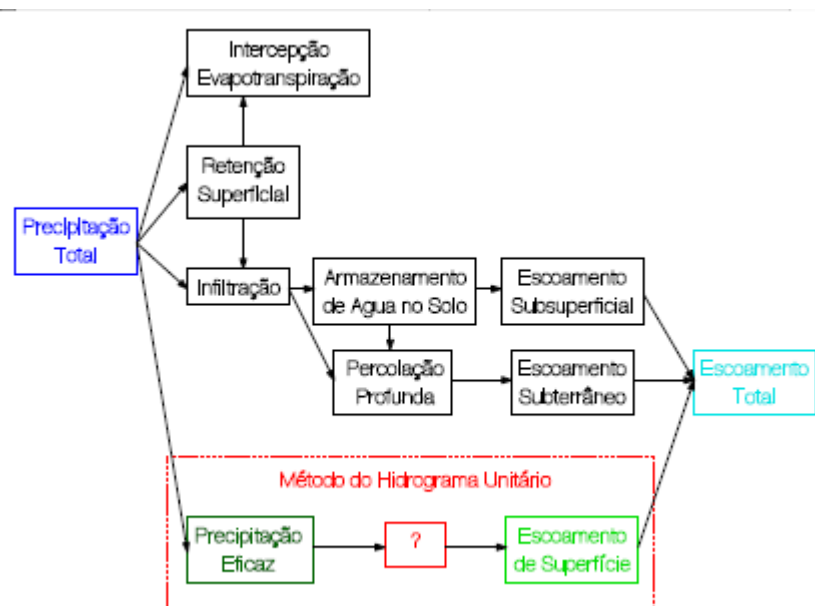


Figura 4.5 – Representação esquemática do ciclo hidrológico, evidenciando a área de aplicação do método do Hidrograma Unitário (Matias, 2012a, adaptado de Morel-Seytoux, 1987).

4.1.3.2. Hidrograma unitário

O método (Lencastre e Franco, 1984; Hipólito e Vaz, 2011; Correia, 1983), teoria (Correia, 1983, Hipólito e Vaz, 2011) ou conceito (Shaw, 1983) do hidrograma unitário (HU) foi proposto pelo engenheiro americano Sherman (1932), sendo muito utilizado para obter o caudal resultante de uma precipitação intensa, aplicando-se fundamentalmente ao estudo de cheias (Hipólito e Vaz, 2011), podendo também ser usado na modelação contínua do escoamento. Sherman definiu o hidrograma unitário como o hidrograma de escoamento direto resultante de uma precipitação útil unitária, com duração t_r igual a D (como seja uma hora ou um dia), uniformemente distribuída no tempo e na bacia hidrográfica (Sherman, 1942, cit. por Shaw, 1983). A duração da precipitação (D) depende da dimensão da bacia hidrográfica e do seu tempo de resposta. A precipitação útil normalmente adotada por Sherman é igual a uma polegada, sendo substituída para um milímetro ou centímetro, quando se adotam as Unidades do Sistema Internacional (SI).

O método do hidrograma unitário, aplicável às bacias hidrográficas em condições naturais (bacias cujos hidrogramas, resultados de saída do sistema modelado, não possam ser devidos à precipitação, dados de entrada do sistema, isto é, bacias sem infraestruturas de armazenamento com capacidade de amortecimento de cheias nem transvases que resultem em modificações do comportamento hidrológico) e de pequena dimensão (bacias cuja capacidade de armazenamento dos cursos de água não interfere na relação precipitação útil - escoamento direto), baseia-se nos postulados seguidamente sintetizados e esquematizados (Fig. 4.6):

1. Proporcionalidade – as ordenadas do hidrograma do escoamento direto resultante duma precipitação útil P_u com a duração D , são iguais às ordenadas do hidrograma unitário, para a mesma duração de precipitação, multiplicadas por P_u .
2. Sobreposição – as ordenadas do hidrograma do escoamento direto resultantes de uma precipitação útil discretizada em intervalos contíguos, com duração D , resultam da soma das ordenadas dos hidrogramas do escoamento direto produzidos separadamente por cada uma das precipitações com essa duração D .
3. Invariabilidade – a relação entre a precipitação útil e o escoamento direto não varia ao longo do tempo, isto é, para uma dada bacia hidrográfica é sempre produzido o mesmo hidrograma unitário, quando ocorre uma precipitação útil unitária com duração D .

Os postulados, anteriormente enunciados, são válidos se:

- A precipitação útil, em cada intervalo de tempo D , tiver intensidade constante ao longo da sua duração e se distribuir de forma uniforme pela bacia hidrográfica;
- O tempo de base do hidrograma do escoamento direto, que resulta de precipitações úteis com uma determinada duração, for constante, o mesmo acontecendo com o tempo da concentração (t_c) da bacia.
- O hidrograma do escoamento direto resultante de uma dada precipitação útil refletir as características invariáveis da bacia hidrográfica natural.

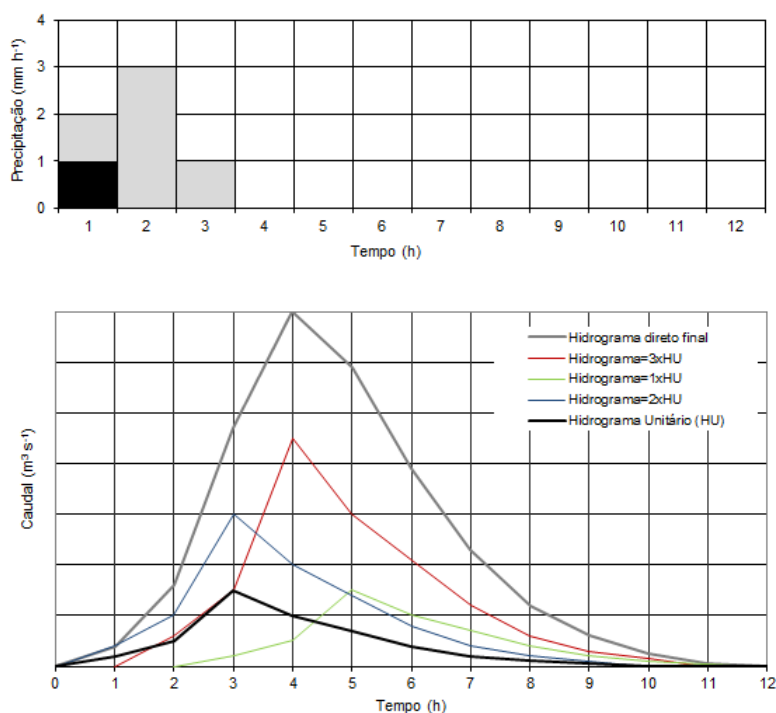


Figura 4.6 – Postulados da proporcionalidade e da sobreposição no método do hidrograma unitário.

Entende-se por tempo de concentração (t_c) de uma bacia hidrográfica o tempo necessário para que, durante a ocorrência de uma precipitação, toda a sua área contribua para o escoamento superficial na secção terminal da bacia, ou seja, é o tempo necessário para que uma gota de água caída no ponto hidráulicamente mais afastado da bacia atinja a secção terminal da mesma (adaptado de Lencastre e Franco, 1984). Na teoria do método do hidrograma unitário é “o tempo necessário para que, com precipitação útil de intensidade constante e elevada duração, se atinja o caudal máximo do escoamento direto na secção de referência, ou ainda, o tempo que

medeia entre o fim da precipitação útil e o fim do escoamento direto na secção de referência” (Hipólito e Vaz, 2011).

Como no método do hidrograma unitário apenas se estabelecem relações entre a precipitação útil e o escoamento direto, para obter o hidrograma de escoamento total é necessário adicionar o escoamento de base ao escoamento direto. Segundo Hipólito e Vaz (2011), no caso do estudo de cheias, a componente de base é pouco significativa quando comparada com a ponta do escoamento direto, em especial em pequenas bacias hidrográficas, podendo mesmo assim ser quantificada, no caso de existirem dados observados.

Uma vez que o método do hidrograma unitário pretende descrever de forma simplificada a resposta de uma bacia hidrográfica em estado natural, apresenta algumas fragilidades (Shaw, 1983):

- O hidrograma direto produzido pelo segundo intervalo de tempo de precipitação útil depende da resposta da bacia à precipitação útil ocorrida no primeiro intervalo, pois há uma dependência entre caudais em instantes consecutivos (persistência) relacionados com a dependência do efeito da precipitação útil nestes caudais, não havendo, por isso, uma real proporcionalidade (colide com o 1º e 2º postulados).
- A bacia hidrográfica responde de forma diferenciada à mesma precipitação útil se ocorrerem alterações no seu comportamento hidráulico, nomeadamente se houver alteração de diferentes rugosidades, associadas por exemplo, ao crescimento da vegetação (colide com o 3º postulado).
- O método assume uma uniformidade temporal e espacial da precipitação, condição meteorológica que raramente se verifica, principalmente em bacias hidrográficas de grande dimensão.
- O método sendo aplicável às bacias hidrográficas em condições naturais, conforme referido anteriormente, não reflete a resposta hidrológica de bacias com infraestruturação de regulação de caudal.

Apesar das fragilidades apresentadas anteriormente, o método do hidrograma unitário é de aplicação simples, sendo, por isso, de grande popularidade e largamente utilizado em todo o mundo há já vários anos (Shaw, 1983; Hipólito e Vaz, 2011). Segundo Heerdegen (1974, cit. por Chow, *et al.*, 1988) quando a informação hidrológica utilizada é criteriosamente selecionada, cumprindo com os pressupostos do método, os resultados da sua aplicação são, genericamente, aceitáveis.

A aplicação do método do hidrograma unitário traduz-se pela equação da convolução discreta $Q_{dj} = \sum_{i=1}^j P_{ui} u_{j-i+1}$, sendo P_{ui} (mm) a altura de precipitação útil no período i , u_k ($m^3 s^{-1}$ de escoamento direto por mm de precipitação útil) as ordenadas do hidrograma unitário (com $k = 1, 2, \dots, M$, sendo M o número de ordenadas do hidrograma unitário) e Q_{dj} ($m^3 s^{-1}$) o caudal associado ao escoamento direto no instante j . Quando se utilizam intervalos de tempo constantes e iguais quer para o hietograma de precipitação útil quer para o hidrograma de escoamento direto a equação de convolução pode escrever-se em função das intensidades de precipitação útil i_{ui} ($mm h^{-1}$):

$$Q_{dj} = \sum_{i=1}^j i_{ui} u_{j-i+1} \quad (4.9)$$

Neste caso, o hidrograma unitário tem unidades de $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ de escoamento direto por mm h^{-1} de precipitação útil. Se expressarmos a intensidade de precipitação útil e o caudal de escoamento direto nas mesmas unidades, ambos em mm h^{-1} ou em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, então o hidrograma unitário fica adimensional e a equação de convolução fica:

$$Q_{dj} = \sum_{i=1}^j i_{ui} \delta_{j-i+1} \quad (4.10)$$

em que o hidrograma unitário adimensional se designou de δ_k . A convolução discreta também pode ser expressa em notação matricial por:

$$\|Q_d\| = \|i_u\|x\|\delta\| \quad (4.11)$$

Naturalmente, as Eqs. (4.10) e (4.11) podem ser utilizadas com u_k no lugar de δ_k , desde que se tenham em consideração as unidades da precipitação útil e do escoamento direto. No entanto, umas das vantagens de utilizar os δ_k é que, para assegurar a conservação da massa, isto é, que o volume de escoamento direto seja igual ao volume da precipitação útil que lhe deu origem, o seu somatório tem de ser igual à unidade (Morel-Seytoux, 1987), o que já não acontece com o somatório dos u_k .

A equação de convolução discreta pode ser aplicada na simulação do escoamento direto quando se conhecem o hietograma de precipitação útil e as ordenadas do hidrograma unitário e, neste caso, os caudais de escoamento direto são valores estimados, \hat{Q}_{dj} . Mas para a sua aplicação é necessário conhecer as ordenadas do hidrograma unitário (adimensional ou não). Tal como apresentado acima para o modelo do SCS, se dispusermos de dados conjuntos de escoamento direto e de precipitação útil podemos identificar os parâmetros do modelo (as ordenadas do hidrograma unitário), resolvendo a equação de convolução em ordem às ordenadas do hidrograma unitário, neste caso as incógnitas. Mas, se não dispusermos de dados de escoamento, o hidrograma unitário tem de ser identificado de outro modo, nomeadamente através de métodos de regionalização.

Assim, conhecido o hietograma de precipitação útil e o hidrograma de escoamento direto, ambos discretizados com o mesmo intervalo de tempo D , a identificação das ordenadas do hidrograma unitário a partir da aplicação da Eq. (4.10) pode efetuar-se através de diversos métodos, como o método das substituições sucessivas ou das equações principais (Chow, *et al.* 1988), o método de Collins (1939 cit por Chow, *et al.*, 1988, Matias, 2012a), o método de programação linear (Chow, *et al.*, 1988 e Hipólito e Vaz, 2011), que minimiza o valor absoluto do erro entre o caudal observado e o caudal estimado e assegura que as ordenadas do hidrograma unitário não sejam negativas, garantindo o cumprimento do princípio da conservação da massa (Hipólito e Vaz, 2011), ou o método dos mínimos dos quadrados (Lencastre e Franco, 1984, Chow, *et al.*, 1988, Matias, 2012a), que minimiza a Soma dos Quadrados das Diferenças (SQD) entre os resultados das equações de convolução discreta (\hat{Q}_{dj}) e as ordenadas do hidrograma de escoamento direto observado (Q_{dj}), sendo definido por,

$$\min SQD = \min \left[\sum_{j=1}^m (Q_{dj} - \hat{Q}_{dj})^2 \right] = \min \left\{ \sum_{j=1}^m \left[Q_{dj} - \sum_{i=1}^j i_{ui} \delta_{(j-i+1)} \right]^2 \right\} \quad (4.12)$$

Sendo m o número de períodos de duração D utilizados na calibração, que corresponde ao número de períodos com escoamento direto. Recorrendo a este método é possível condicionar os resultados do SQD com a introdução de restrições, nomeadamente que assegurem o princípio da conservação da massa e a ausência de ordenadas do hidrograma unitário negativas.

Antes da aplicação de qualquer um destes métodos é necessário saber quantas são as ordenadas do hidrograma unitário a identificar. O seu valor, M (também designado de memória do sistema), corresponde à duração do hidrograma do escoamento direto após o final do acontecimento pluvioso útil que lhe deu origem, sendo dado por:

$$M = N_d - N_{Pu} + 1 \quad (4.13)$$

sendo, N_d a duração do hidrograma do escoamento direto (número de valores não nulos de caudal) e N_{Pu} a duração do acontecimento pluvioso útil (número de valores de precipitação útil), todos expressos em períodos temporais. Considera-se que dois eventos são independentes se estiveram separados por um intervalo sem precipitação durante o qual o escoamento direto se anula antes do início da segunda chuva.

Em todos os métodos de resolução da equação da convolução discreta deve assegurar-se o princípio da conservação da massa, isto é, o volume de precipitação útil tem de ser igual ao volume de escoamento direto, $P_u = E_d$, igualdade já utilizada na calibração do método que conduziu à identificação do hietograma de precipitação útil. Como referido acima, isso consegue-se assegurando que a soma das ordenadas do hidrograma unitário adimensional seja igual à unidade.

Note-se que no processo de calibração, para além de poderem existir erros por os pressupostos do método não se verificarem na totalidade, existem sempre erros no hietograma de precipitação útil e no hidrograma de escoamento direto, os quais não são observados, sendo já o resultado da separação dos componentes do hidrograma de escoamento total efetuada e do modelo utilizado na obtenção do hietograma de precipitação útil a partir do hietograma de precipitação total.

Na literatura científica há uma enorme variedade de áreas sugeridas como limite superior para a aplicabilidade do método do hidrograma unitário (Linsley, *et al.*, 1982; Shaw, 1983; Chow, *et al.*, 1988; Ponce, 1989, Hipólito e Vaz, 2011). Mais do que definir uma área limite importa considerar que o método é aplicável em bacias em que os seus pressupostos são válidos, nomeadamente com precipitação uniforme espacialmente e com cursos de água com capacidade de armazenamento desprezável, o que se verifica em bacias de pequena e média dimensão.

Na presente análise a calibração das ordenadas no hidrograma unitário foi efetuada com o método dos mínimos quadrados, com introdução de duas restrições: a primeira assegura a equivalência entre o volume do escoamento direto e o volume da precipitação útil que lhe deu origem e assegura que a soma das ordenadas do hidrograma unitário adimensional é igual a um (garantindo o cumprimento do princípio da conservação da massa) e a segunda impõe somente ordenadas não negativas.

4.1.3.3. Hidrograma unitário resultante de diversos hidrogramas observados

A obtenção do hidrograma unitário característico de uma bacia hidrográfica resulta da análise dos diversos hidrogramas unitários obtidos a partir de vários acontecimentos pluviosos, que não são idênticos mas distintos (Hipólito e Vaz, 2011, Shaw, 1983), mas com formas semelhantes (Shaw, 1983). Existem diferentes métodos que permitem obter o hidrograma unitário característico de uma dada bacia hidrográfica, sendo que alguns destes se referem seguidamente.

Hipólito e Vaz (2011) sugerem que o hidrograma unitário característico pode resultar da seleção, entre os hidrogramas unitários obtidos a partir da análise de vários acontecimentos pluviosos, do hidrograma unitário resultante do hidrograma de escoamento direto com menor tempo de concentração, do qual resultará um maior caudal de ponta de cheia, ou do hidrograma unitário que corresponda sensivelmente a uma média dos hidrogramas obtidos. Os mesmos autores referem que “a escolha da técnica dependerá do objetivo e das condições de segurança exigíveis na aplicação que se vá fazer”.

Shaw (1983) apresenta um método onde se considera que o hidrograma unitário característico pode ser obtido a partir da média aritmética dos caudais e da duração dos diversos hidrogramas unitários não adimensionais, assegurando que o volume final é igual ao volume unitário da precipitação útil.

Matias (2012a) descreve métodos gráficos onde o hidrograma unitário característico resulta da média aritmética ou da mediana das ordenadas de diversos hidrogramas unitários adimensionais, podendo, também, efetuar-se previamente o alinhamento dos diversos hidrogramas unitários adimensionais pelo valor máximo (Fig. 4.7), sendo que este acerto não provoca a atenuação do valor máximo, mas distorce a forma do hidrograma final. Segundo Boorman e Reed (1981) nenhum destes métodos gráficos é totalmente satisfatório sendo preferível utilizar o método da sobreposição dos acontecimentos.

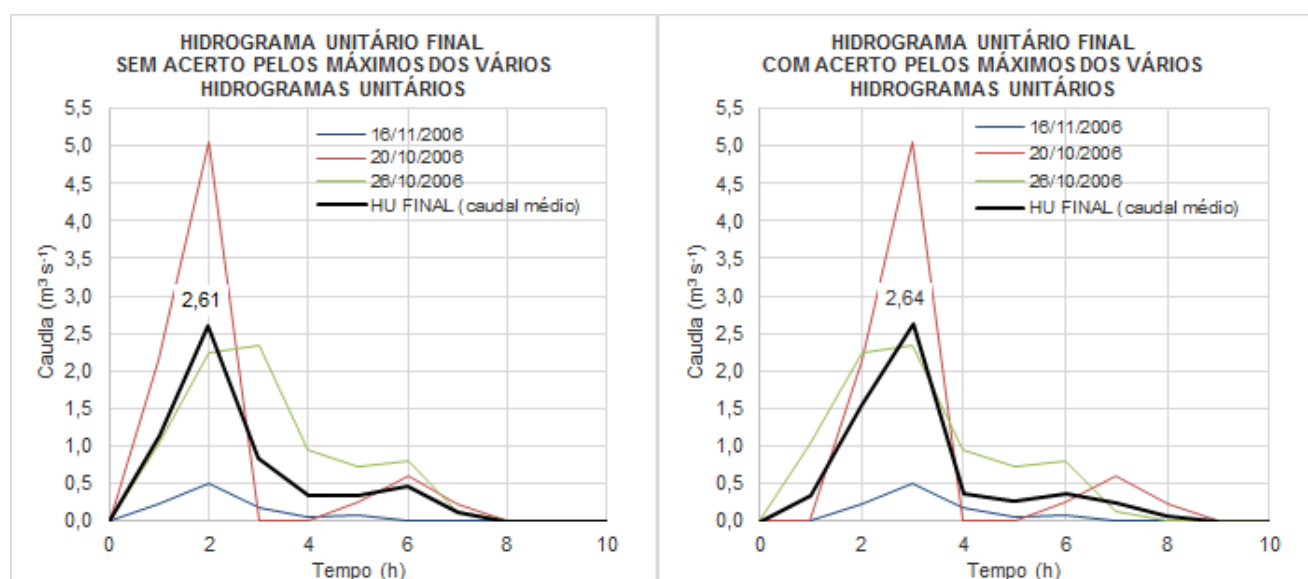


Figura 4.7 – Esquema para obtenção do hidrograma unitário característico resultante da análise gráfica de diferentes acontecimentos hidrometeorológicos (exemplo com hidrogramas unitários não adimensionais).

Matias (2012a) apresenta o método de sobreposição dos acontecimentos hidrometeorológicos para a determinação do hidrograma unitário característico. Os diversos hidrogramas de escoamento direto são alinhados temporalmente pelo seu caudal máximo, mantendo-se o sincronismo com os respectivos hietogramas de precipitação útil, que sofrem assim uma translação e, finalmente, obtém-se um acontecimento único composto pela soma das ordenadas dos hietogramas e dos hidrogramas, respetivamente (Fig. 4.8). A este acontecimento “único” aplica-se um dos métodos para resolver a equação da convolução discreta. O método de sobreposição dos acontecimentos pode ser traduzido matematicamente pelas Eqs. (4.14) e (4.15):

$$P_u(m_p) = \sum_{i=1}^{N_s} W_i P_{ui}(m_p - \theta_i) \quad (4.14)$$

$$Q_d(m_d) = \sum_{i=1}^{N_s} W_i Q_{di}(m_d - \theta_i) \quad (4.15)$$

sendo, N_s o número de acontecimentos hidrometeorológicos, $P_u(m_p)$ e $Q_d(m_d)$ a precipitação útil e o caudal direto nos períodos m_p e m_d , respetivamente, W_i um fator de ponderação que poderá ser utilizado no caso de haver necessidade de distinguir eventos hidrometeorológicos cujos dados sejam menos fiáveis, e θ_i o desfaseamento temporal utilizado para os diferentes acontecimentos.

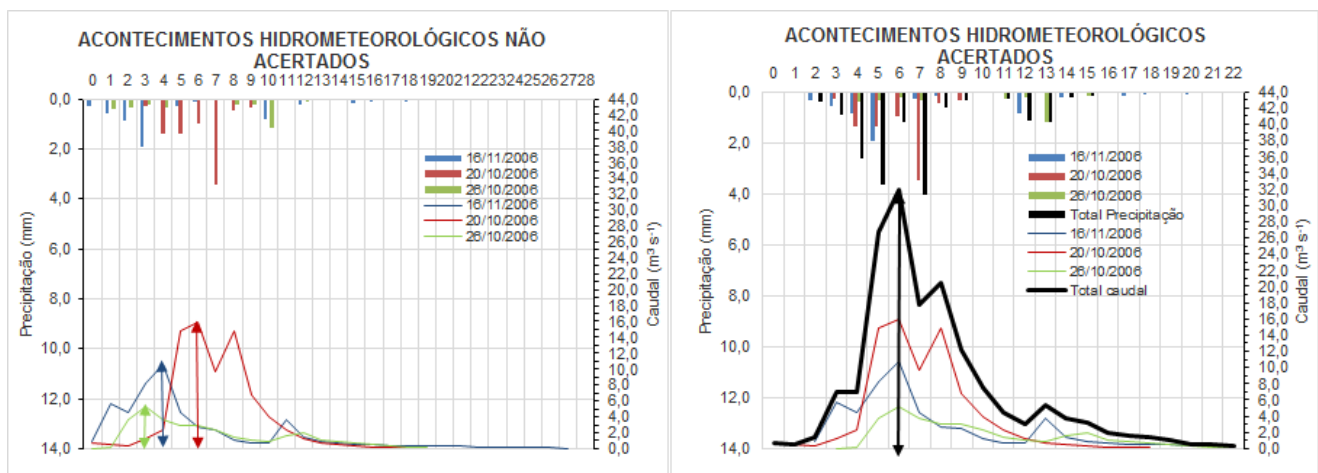


Figura 4.8 – Esquema para obtenção do hidrograma direto resultante da sobreposição de diferentes acontecimentos hidrometeorológicos.

A obtenção das ordenadas do hidrograma unitário característico requer a determinação da memória do sistema resultante, que deverá ser próxima da maior memória entre as identificadas nos eventos hidrometeorológicos considerados, ou mesmo a maior (Diskin e Boneh, 1965 e Boorman e Reed, 1981 cit. por Matias, 2012a).

Na presente análise determinou-se o hidrograma unitário final recorrendo a um método gráfico, alinhando os diversos hidrogramas unitários adimensionais pelo valor máximo (ponta), e ao método da sobreposição dos acontecimentos, com alinhamento pelo caudal máximo dos hidrogramas diretos. Optou-se por selecionar o método da sobreposição dos acontecimentos para realizar a modelação precipitação-escoamento (capítulo 5), uma vez que é aquele que incorpora, para além dos caudais observados, as precipitações dos acontecimentos em análise. No **Anexo 11** apresentam-se os hidrogramas unitários resultantes do método gráfico.

4.1.3.4. Hidrogramas unitários sintéticos do SCS e de Temez

Considerando o grande interesse da utilização do hidrograma unitário desenvolveram-se modelos para, na ausência de dados hidrometeorológicos suficientes, obter um hidrograma unitário sintético a partir das características fisiográficas da bacia hidrográfica. As principais características fisiográficas das sete bacias hidrográficas em estudo foram apresentadas no subcapítulo 2.1 e serão utilizadas para a determinação dos hidrogramas unitários sintéticos que serão aplicados neste estudo: Soil Conservation Service (SCS), Temez e Clark.

O hidrograma unitário sintético do SCS (SCS, 1972 e USDA, 2007) apresenta duas formulações adimensionais padronizadas, o curvilíneo e o equivalente triangular, tendo sido determinado a partir de hidrogramas unitários de bacias naturais em diversas localizações geográficas e com diferentes dimensões (Fig. 4.9). As coordenadas foram adimensionalizadas dividindo os tempos (t) pelo tempo para a ponta, t_p , e os caudais (q) pelo caudal de ponta, q_p , resultando num hidrograma onde 37,5 % do volume total ocorre até ao tempo para a ponta, que corresponde a uma constante de ponta de 0,75 (SCS, 1972 e USDA, 2007). O produto desta constante com o fator de conversão das unidades (0,277) resulta na constante da Eq. (4.21). Esta constante, que influencia a forma do hidrograma, pode variar entre aproximadamente 0,5 e 1, respetivamente, em bacias planas ou em bacias muito declivosas (SCS, 1972 e USDA, 2007). Neste hidrograma, o tempo para o ponto de inflexão, t_i , ocorre no instante $1,7 t_p$ (SCS, 1972). As coordenadas destes hidrogramas unitários sintéticos adimensionais (SCS, 1972, Hoggan, 1989 e USDA, 2007) indicam-se no Quadro 4.2.

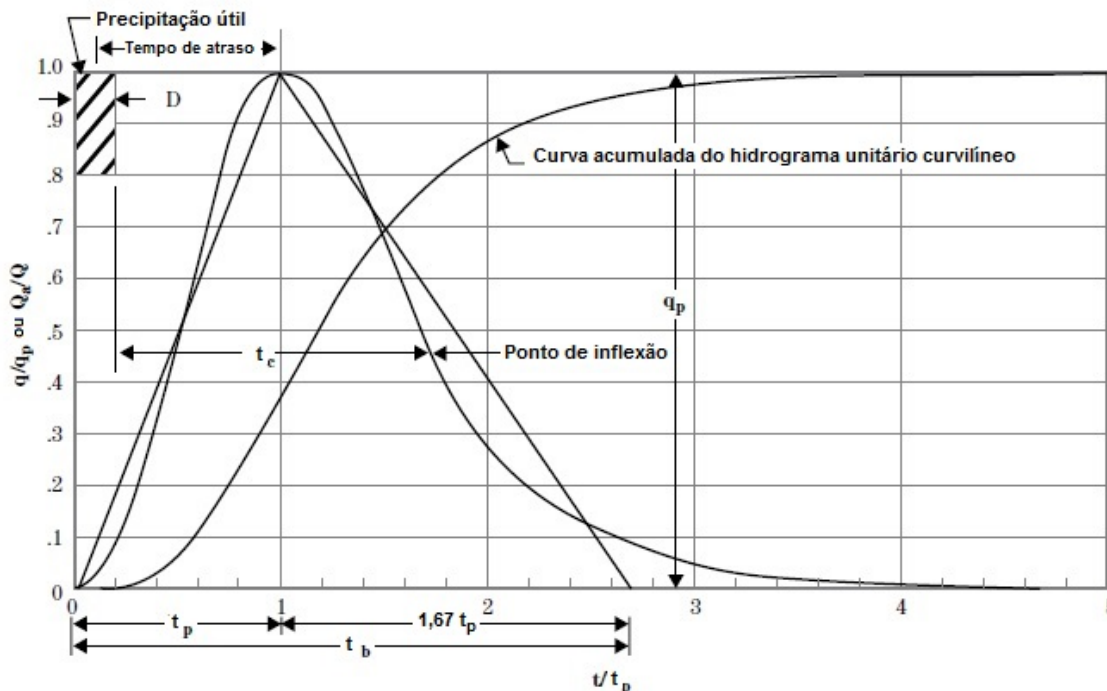


Figura 4.9 – Hidrogramas unitários sintéticos adimensionais do Soil Conservation Service, curvilíneo e o equivalente triangular ou de Mockus (adaptado de SCS, 1972, Hoggan, 1989 e USDA, 2007).

Quadro 4.2 - Coordenadas adimensionais dos hidrogramas unitários do Soil Conservation Service curvilíneo (SCS, 1972 e Hoggan, 1989 e triangular ou Mockus (SCS, 1972).

Curvilíneo (SCS, 1972, Hoggan, 1989)				Triangular ou Mockus (SCS, 1972)			
t/t_p	q/q_p	t/t_p	q/q_p	t/t_p	q/q_p	t/t_p	q/q_p
0,0	0,000	1,7	0,460	0,0	0,00	1,7	0,58
0,1	0,030	1,8	0,390	0,1	0,10	1,8	0,52
0,2	0,100	1,9	0,330	0,2	0,20	1,9	0,46
0,3	0,190	2,0	0,280	0,3	0,30	2,0	0,40
0,4	0,310	2,2	0,207	0,4	0,40	2,1	0,34
0,5	0,470	2,4	0,147	0,5	0,50	2,2	0,28
0,6	0,660	2,6	0,107	0,6	0,60	2,3	0,22
0,7	0,820	2,8	0,077	0,7	0,70	2,4	0,16
0,8	0,930	3,0	0,055	0,8	0,80	2,5	0,10
0,9	0,990	3,2	0,040	0,9	0,90	2,6	0,04
1,0	1,000	3,4	0,029	1,0	1,00	2,67	0,00
1,1	0,990	3,6	0,021	1,1	0,94		
1,2	0,930	3,8	0,015	1,2	0,88		
1,3	0,860	4,0	0,011	1,3	0,82		
1,4	0,780	4,5	0,005	1,4	0,76		
1,5	0,680	5,0	0,000	1,5	0,70		
1,6	0,560			1,6	0,64		

Estes hidrogramas unitários sintéticos, propostos pelo SCS (1972), são expressos pelas equações seguintes, em que todos os tempos estão expressos em hora:

$$t_p = \frac{D}{2} + t_l \quad (4.16)$$

em que o tempo de atraso t_l (Fig. 4.9) corresponde ao intervalo temporal entre o centroide do hietograma útil e a ponta do hidrograma direto e depende da capacidade máxima de retenção de água no solo, S (mm), que é função do Número de Escoamento (N) considerando condições antecedentes de humidade média – AMC_{II} (alínea 4.1.2. e **Anexo 12**), do declive médio da bacia hidrográfica Y (%) e do seu comprimento, definido pelo comprimento do curso de água principal L (m), prolongado até à linha de cumeada:

$$t_l = \frac{L^{0,8}(0,03937S+1)^{0,7}}{734,43Y^{0,5}} \quad (4.17)$$

O intervalo de discretização e duração D da precipitação útil, associada ao hidrograma unitário, deve ser suficientemente pequeno para se conseguir descrever o ramo ascendente do hidrograma. Como regra prática (valor aconselhado), devem utilizar-se cerca de 5 pontos para o efeito, o que corresponde a utilizar $D = t_p/5$, o que conduz, considerando a relação entre t_{SCS} e t_l dada pela Eq. (4.20) e a expressão para t_p dada pela Eq. (4.16), a:

$$D = 0,133t_{SCS} \quad (4.18)$$

em que t_{cSCS} corresponde à definição de tempo de concentração dada pelo SCS, de duração entre o final da precipitação útil até ao ponto de inflexão do hidrograma unitário curvilíneo. Segundo Hipólito e Vaz (2011) este relaciona-se com a definição do tempo de concentração do hidrograma unitário definida na alínea 4.1.3.2. pela seguinte equação:

$$t_{cSCS} = 0,61t_c \quad (4.19)$$

Este tempo de concentração pode também ser estimado como função do tempo de atraso:

$$t_{cSCS} = \frac{t_l}{0,6} \quad (4.20)$$

O tempo de base do hidrograma unitário, t_b , corresponde à sua duração, e pode ser visualizado como a soma do tempo para a ponta (ou tempo de crescimento) com o tempo de decrescimento, desde a ponta até ao fim do hidrograma, como se pode observar na Fig. 4.9 ou no Quadro 4.2. Assim, $t_b = 5t_p$ ou $t_b = 2,67t_p$, consoante se trate do hidrograma curvilíneo ou triangular, respetivamente.

Finalmente, o caudal máximo ou de ponta do hidrograma unitário ($m^3 s^{-1}$), é dado por:

$$q_p = \frac{0,208A}{t_p} \quad (4.21)$$

sendo A a área da bacia hidrográfica (km^2).

Considerando as relações expressas pelas Eqs. (4.20) e (4.19), as equações que definem nos hidrogramas unitários sintéticos o intervalo de tempo D e o tempo para a ponta t_p dados pelas Eqs. (4.16) e (4.18), podem exprimir-se em função do tempo de concentração t_c :

$$t_p = 0,407t_c \quad (4.22)$$

$$D = 0,081t_c \quad (4.23)$$

$$t_l = 0,366t_c \quad (4.24)$$

Estes hidrogramas unitários sintéticos permitem estimar o escoamento direto de um evento de cheia utilizando apenas dois parâmetros, área de drenagem da bacia hidrográfica e tempo de concentração. Contudo, para manter válidas as condições de aplicabilidade do método do hidrograma unitário (enunciadas na alínea 4.3.2.) será aconselhável considerar a divisão em sub-bacias hidrográficas com características hidrológicas uniformes e, por isso, o SCS (1972) indica que as áreas destas bacias não deverão ser maiores do que cerca de $52 km^2$ e deverão ter um padrão homogéneo de drenagem. Por outro lado, a utilização do método do hidrograma unitário sintético triangular do SCS (1973) está, em geral, limitado superiormente a áreas de drenagem de cerca de $8 km^2$ e a bacias hidrográficas com declives médios menores que 30 %.

O hidrograma unitário sintético de Temez (1978, 1987) está representado na Fig. 4.10, onde se indicam algumas das relações matemáticas que o caracterizam.

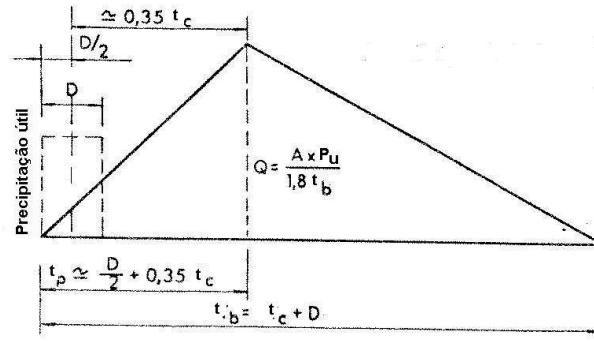


Figura 4.10 – Hidrograma sintético unitário de Temez (Temez, 1978).

Este hidrograma, aplicável a bacias hidrográficas com áreas até 2000 km² e durações da precipitação unitária de acordo com a Eq. (4.29), é descrito pelas equações seguintes,

$$q_p = \frac{AP_u}{1,8t_b} \quad (4.25)$$

$$t_p = \frac{D}{2} + 0,35t_c \quad (4.26)$$

$$t_{cT} = 0,3 \left(\frac{L_{ca}}{J^{1/4}} \right)^{0,76} \quad (4.27)$$

$$t_b = D + t_c \quad (4.28)$$

$$D \leq \frac{1}{5} t_c \quad (4.29)$$

sendo, t_p o tempo de crescimento ou tempo para a ponta (h), A a área da bacia hidrográfica (km²), P_u a altura da precipitação útil igual 1 mm, D a duração da precipitação útil (h), q_p o caudal de ponta (m³ s⁻¹), associado à precipitação útil unitária (mm) ocorrida na duração D , t_b o tempo de base (h), t_{cT} o tempo de concentração (h), L_{ca} o comprimento do curso de água principal (km) e J o declive médio do curso de água principal (-).

Segundo Temez (1987), comprova-se experimentalmente que o tempo de concentração é característico de cada bacia hidrográfica e, portanto, independente da configuração e magnitudes das precipitações. Assim, apesar de uma maior intensidade de precipitação conduzir a um menor t_c , resultante de um aumento do escoamento e da velocidade de escoamento, este efeito é anulado pela escorrência sobre a superfície terrestre, que provoca uma atenuação e atraso na drenagem superficial, conduzindo a uma duração do tempo de concentração constante independentemente da intensidade da precipitação considerada.

No **Anexo 13** apresentam-se os valores associados aos parâmetros que definem o hidrograma unitário sintético segundo SCS e Temez para as sete bacias hidrográficas.

4.1.3.5. Hidrograma unitário de Clark

Quando a hipótese de homogeneidade da distribuição espacial da precipitação útil perde validade, quer por se tratar de bacias hidrográficas de grande dimensão, quer por porções da bacia apresentarem solos e coberto vegetal tão distintos que possuam características de infiltrabilidade e intercepção muito distintas, e/ou quando nas bacias de grande dimensão, com cursos de água longos e bem desenvolvidos, o tempo de escoamento naqueles passa a ser da mesma ordem de grandeza ou superior ao do escoamento nas encostas, o hidrograma unitário clássico, determinístico, empírico e agregado, apresentado na alínea 4.1.3.2., deixa de ser aplicável (adaptado de Matias, 2012a).

Para ultrapassar estas limitações surgiu o conceito do hidrograma unitário generalizado, que se pode ver como uma generalização do método do hidrograma unitário, que passa a poder ser aplicado como um modelo semi-distribuído no espaço. É um modelo que ainda não recorre a uma formulação com grande base física, mas que tira partido da conjugação do método do hidrograma unitário com a divisão da bacia hidrográfica em isócronas, a qual já incorpora alguns conceitos relativos à hidráulica do escoamento.

Este método pode ser visto sob duas perspetivas:

- A primeira considera que cada área centrada à volta de uma isócrona se pode modelar com o método do hidrograma unitário agregado e que, uma vez obtido o hidrograma de escoamento direto na secção de jusante de cada subárea, aquele sofre uma translação espacial e temporal, atingindo a secção de jusante após o valor da isócrona respetiva. O hidrograma de escoamento na secção de jusante da bacia corresponde à soma dos hidrogramas produzidos em todas as subáreas em que a bacia foi dividida.
- A segunda considera que o diagrama tempo-área pode ser visto como a translação de uma intensidade de precipitação unitária homogénea sobre a bacia consoante os tempos de escoamento associados a cada isócrona e das respetivas áreas. O efeito de armazenamento da bacia pode depois ser obtido propagando o hietograma obtido (ou hidrograma de caudais médios) através de um reservatório.

O método do hidrograma unitário generalizado designa-se de hidrograma unitário de Clark (1945) quando o hidrograma unitário associado a cada subárea corresponde ao funcionamento de um reservatório linear (primeira interpretação) ou quando a secção de referência da bacia hidrográfica é o reservatório linear que recebe como dado de entrada o diagrama tempo-área (segunda interpretação) (Fig. 4.11). Assim, este método considera duas componentes do movimento da água precipitada na bacia hidrográfica: translação (circulação ou movimento) da água sobre a bacia hidrográfica, representada pelo diagrama tempo-área, e o amortecimento do escoamento, associado ao armazenamento de água na bacia hidrográfica, desde o ponto onde ocorre a precipitação até à secção de referência, através do reservatório linear. Este hidrograma é frequentemente designado por método do diagrama tempo-área.

O diagrama tempo-área poderá ser obtido através do traçado das isócronas, isto é, das linhas definidas pelos pontos de igual tempo de percurso do escoamento até à secção de referência da bacia hidrográfica (Fig. 4.11), cujas áreas entre isócronas fornecem as ordenadas do diagrama e o tempo a informação das abcissas, quando ocorre uma intensidade de precipitação constante com duração igual ao superior ao tempo de percurso

determinado. O tempo necessário para que toda a bacia hidrográfica contribua para o escoamento na secção de referência ou final, valor da duração total do diagrama tempo-área, corresponde ao tempo de concentração da bacia hidrográfica.

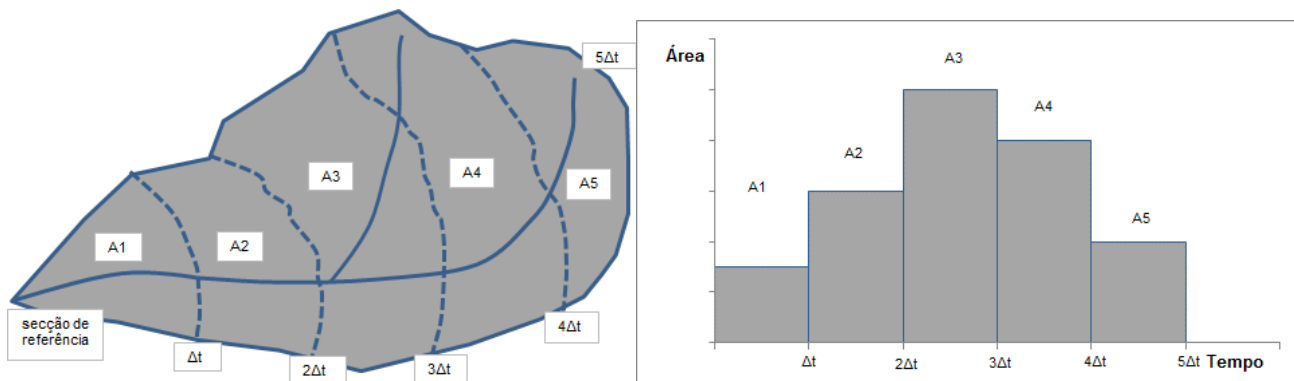


Figura 4.11 – Isócronas e diagrama tempo-área.

O diagrama tempo-área pode interpretar-se como tendo a forma do hidrograma unitário (Viessman e Lewis, 1996): a ocorrência de uma precipitação útil unitária sobre a área A1 resulta no escoamento que chega durante o primeiro instante à secção de referência; o volume escoado resulta do produto entre a área A1 e a unidade de precipitação e quando todas as áreas contribuírem, associadas à precipitação unitária, será possível determinar o volume total escoado na secção de referência.

A precipitação útil que ocorre sobre uma bacia hidrográfica não contribui de imediato para o escoamento superficial na secção de jusante, pois uma parte está temporariamente armazenada na bacia que, por isso, se comporta como um reservatório (Fig. 4.12). Na 1ª perspectiva existem reservatórios associados a cada área definida por cada isócrona. Na 2ª perspectiva, o efeito de armazenamento da bacia hidrográfica é representado por um modelo de reservatório linear com um coeficiente de armazenamento característico, que se admite situar-se na secção de referência da bacia hidrográfica (Fig. 4.12).

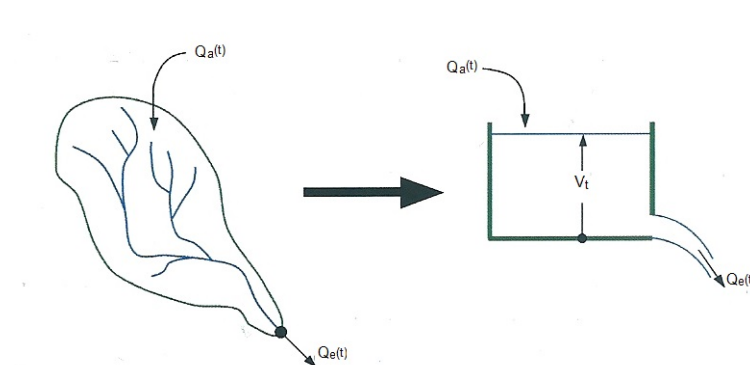


Figura 4.12 – Bacia hidrográfica como modelo de reservatório linear (adaptado de Matias, 2012a).

Num reservatório linear, no instante t , o caudal $Q_e(t)$ é proporcional ao volume armazenado no reservatório, V_t , Eq. (4.30), onde K é o coeficiente de armazenamento ou a constante temporal do reservatório linear,

$$V_t = KQ_e(t) \quad (4.30)$$

O coeficiente de armazenamento, expresso em unidades de tempo, tem frequentemente valores semelhantes ao tempo de atraso de uma bacia hidrográfica (Viessman e Lewis, 1996). O princípio de conservação da massa aplicado sob a forma diferencial da equação da continuidade é:

$$\frac{dV_t}{dt} = Q_a(t) - Q_e(t) \quad (4.31)$$

sendo, Q_a e Q_e os caudais afluentes e efluentes, respetivamente, do reservatório e V_t o volume armazenado. Derivando em ordem ao tempo o volume armazenado, expresso pela Eq. (4.30), e substituindo a expressão obtida no membro esquerdo da Eq. (4.31), conduz a:

$$K \frac{dQ_e(t)}{dt} = Q_a(t) - Q_e(t) \quad (4.32)$$

Discretizando a equação anterior por diferenças finitas resulta em,

$$K \frac{\Delta Q_e}{\Delta t} = \overline{Q}_{a\Delta t} - \overline{Q}_{e\Delta t} \quad (4.33)$$

em que $\overline{Q}_{a\Delta t}$ e $\overline{Q}_{e\Delta t}$ representam o caudal afluente médio e o caudal efluente médio, respetivamente, durante o intervalo de tempo Δt . A Eq. (4.33) pode ser expressa por:

$$K \frac{(Q_{e2} - Q_{e1})}{\Delta t} = \overline{Q}_{a\Delta t} - \overline{Q}_{e\Delta t} \quad (4.34)$$

Aceitando a aproximação $\overline{Q}_e = (Q_{e1} + Q_{e2})/2$, pode obter-se a expressão para o caudal efluente no final de qualquer Δt :

$$K \frac{(Q_{e2} - Q_{e1})}{\Delta t} = \overline{Q}_{a\Delta t} - \frac{(Q_{e1} + Q_{e2})}{2} \quad (4.35)$$

Sendo o sistema uma bacia hidrográfica, o caudal afluente e efluente correspondem, respetivamente, à intensidade média de precipitação útil no intervalo Δt que entra no reservatório linear, $p_u^*(t)$, e ao caudal direto instantâneo observado na secção de jusante da bacia hidrográfica, logo a equação anterior resolvida em ordem a Q_{e2} , conduz a:

$$Q_{e2} = \left(\frac{2\Delta t}{2K + \Delta t} \right) \overline{Q}_{a\Delta t} + \left(\frac{2K - \Delta t}{2K + \Delta t} \right) Q_{e1} \quad (4.36)$$

Fazendo,

$$C = \frac{2\Delta t}{2K + \Delta t} \quad (4.37)$$

Vem,

$$1 - C = \frac{2K - \Delta t}{2K + \Delta t} \quad (4.38)$$

e a equação de propagação, Eq. (4.36), fica:

$$Q_{e2} = C\overline{Q_{a\Delta t}} + (1 - C)Q_{e1} \quad (4.39)$$

A resolução da expressão para C , Eq. (4.37), em ordem a K conduz a:

$$K = \frac{2\Delta t - C\Delta t}{2C} \quad (4.40)$$

Dados os caudais observados, associados ao escoamento direto, e as intensidades de precipitação eficaz (ou útil) que entram no reservatório, pode estimar-se o coeficiente de propagação C através da minimização da soma dos quadrados das diferenças (SQD) entre os caudais observados e os obtidos por aplicação da Eq. (4.39). Para i acontecimentos hidrometeorológicos obtêm-se i coeficientes C_i e, por aplicação da Eq. (4.40), i coeficientes de armazenamento, K_i . O coeficiente de armazenamento para cada bacia hidrográfica, \overline{K} , pode estimar-se como a média aritmética dos K_i assim obtidos.

Dado o hietograma de precipitação útil sobre a bacia é possível considerá-lo distribuído no espaço, com valores distintos em cada área associada à isócrona θ (período): $p_{u,\theta}(t)$. Como as áreas associadas às diferentes isócronas são distintas, deve multiplicar-se cada intensidade de precipitação pela correspondente fração da área total da bacia (f_θ) ocupada pela isócrona, seguida da sua translação temporal até à secção de jusante da bacia, onde se encontra o reservatório linear (Morel-Seytoux, 1987):

$$p_u^*(\lambda) = \sum_{\theta=1}^{\theta_M} f_\theta p_{u,\theta}(\lambda - \theta + 1) \quad (4.41)$$

em que θ_M corresponde ao tempo de concentração da bacia, expresso em período de tempo ($\theta_M = t_c/N$) e a fração da área total da bacia é a função da ordenada do diagrama tempo-área:

$$f_\theta = \frac{A_\theta}{A} \quad (4.42)$$

sendo, A a área da bacia hidrográfica (km²) e A_θ a área parcelar da bacia hidrográfica (km²) associada à isócrona θ .

Nos Quadros 4.3. exemplificam-se a obtenção deste “caudal” afluente (precipitação útil) e efluente (caudal direto na secção de referência), considerando, de uma forma simplificada, uma precipitação sobre a bacia homogênea em área.

Quadro 4.3a - Exemplo de aplicação do hidrograma de Clark: (1) Diagrama tempo-área.

Tempo (h)	Área (km ²)	f_{θ} (-) Eq. (4.42)
1	6,7	0,209
2	21,9	0,664
3	4,4	0,133
Total	33,0	1,000

Neste caso, a forma numérica da Eq. (4.41) é:

$$p_u^*(\lambda) = 0,209p_{u,1}(\lambda) + 0,664p_{u,2}(\lambda - 1) + 0,133p_{u,3}(\lambda - 2) \quad (4.43)$$

Quadro 4.3b – Exemplo de aplicação do hidrograma de Clark: (2) Hietograma de precipitação útil, homogênea sobre a bacia, dividida em três isócronas θ (período).

Tempo (h)	p_u (mm h ⁻¹)		
	$\theta = 1$	$\theta = 2$	$\theta = 3$
1	0,17	0,17	0,17
2	0,73	0,73	0,73
3	0,00	0,00	0,00

Quadro 4.3c – Exemplo de aplicação do hidrograma de Clark: (3) Determinação dos caudais afluentes (Q_a) e efluentes (Q_e) considerando o coeficiente de propagação (C) de 0,481 h⁻¹, que corresponde ao coeficiente de armazenamento (K) de 1,578 h, o diagrama tempo-área do Quadro 4.3a e o hietograma de precipitação útil do Quadro 4.3b.

Tempo (λ)	$0,209 p_{u,1}(\lambda)$ (mm h ⁻¹)	$0,664 p_{u,2}(\lambda-1)$ (mm h ⁻¹)	$0,133 p_{u,3}(\lambda-2)$ (mm h ⁻¹)	$p_u^*(\lambda)$ (mm h ⁻¹)	$Q_a(\lambda) = p_u^*(\lambda)$ (m ³ s ⁻¹)	Q_e (Eq. 4.39) (m ³ s ⁻¹)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,0	0,00	0,00	0,03	0,316	0,152
2	0,15	0,11	0,00	0,26	2,393	1,230
3	-	0,48	0,02	0,51	4,649	2,875
4	-	-	0,10	0,10	0,892	1,921
5	-	-	-	-	-	0,997
6	-	-	-	-	-	0,517
7	-	-	-	-	-	0,268
8	-	-	-	-	-	0,139
9	-	-	-	-	-	0,072
10	-	-	-	-	-	0,038
11	-	-	-	-	-	0,019
12	-	-	-	-	-	0,010
13	-	-	-	-	-	0,005
14	-	-	-	-	-	0,003
15	-	-	-	-	-	0,001
16	-	-	-	-	-	0,001
17	-	-	-	-	-	0,000

Legenda: A conversão da precipitação útil de mm h⁻¹ a m³ s⁻¹ corresponde à multiplicação pelo fator A (km²)/3,6.

Estudos desenvolvidos pelo *Hydrologic Engineering Center*, através da análise do comportamento de um conjunto de bacias hidrográficas, conduziram à definição de um diagrama tempo-área adimensional (Paço, 2008), adequado à determinação do hidrograma unitário na maioria das bacias hidrográficas (HEC-HMS, 2010). Este diagrama tipo está incorporado em várias versões do programa HEC-HMS (Fig. 4.13), onde se relaciona a relação entre a área acumulada da bacia hidrográfica (A_a) e a área total da bacia hidrográfica (A) com a correspondente fração acumulada do tempo de concentração (t/t_c) definida por:

$$\frac{A_a}{A} = 1,414 \frac{t^{1,5}}{t_c} \quad 0 \leq \frac{t}{t_c} < 0,5 \quad \therefore 1 - \frac{A_a}{A} = 1,414 \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1,5} \quad 0,5 \leq \frac{t}{t_c} < 1 \quad (4.44)$$

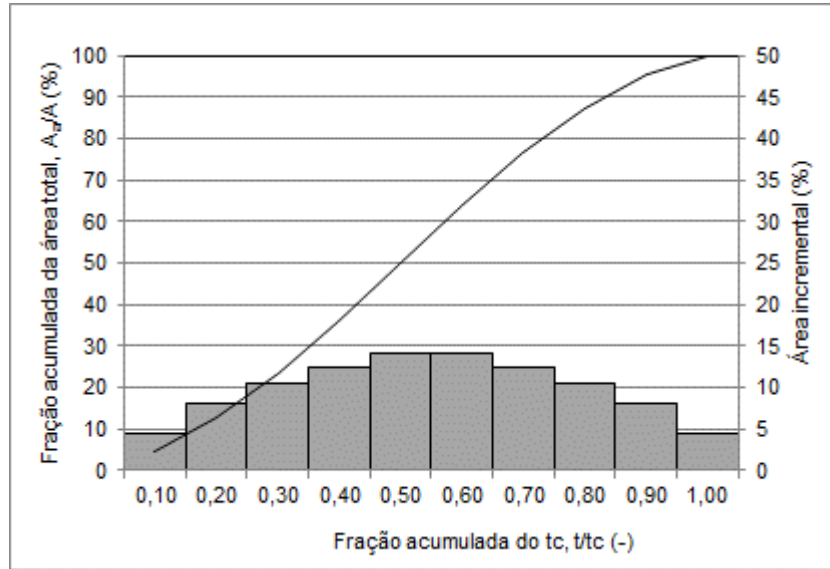


Figura 4.13 – Diagrama tempo-área sintético (Clark, HEC-HMS).

Existem vários processos para determinar as isócronas e correspondente diagrama tempo-área. Como referido em Chow, *et al.* (1988), o tempo de percurso do escoamento t (s) entre dois pontos de uma bacia hidrográfica, que se encontrem a uma determinada distância, pode ser estimado pelo somatório de H tempos de percurso ao longo do trajeto composto por troços de comprimento Δl_i (m), em que se possa considerar a velocidade ser constante v_i (m s⁻¹):

$$t = \sum_{i=1}^H \frac{\Delta l_i}{v_i} \quad (4.45)$$

As velocidades podem ser estimadas recorrendo a procedimentos hidrológicos ou hidráulicos. Com o objetivo de aplicar ambos procedimentos foi necessário construir um Modelo de Elevação do Terreno (MET) que permitiu definir uma rede hidrográfica de suporte à determinação dos comprimentos dos cursos de água e dos seus declives. O MET foi desenvolvido tendo como base informação topográfica com precisão de 80 m, definindo uma rede de drenagem com célula de 80 m x 80 m, que equivale a uma área de 0,0064 km². O modelo digital do terreno e respetivos valores de altitude utilizou o SRTM (*NASA Shuttle Radar Topographic Mission*) do USGS (*United States Geological Survey*), na versão 4 reprocessada e corrigida pela CGIAR-CSI (*Consortium for Spatial Information*), com uma resolução de 3 segundos de arco, aproximadamente 90 metros (<http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>). O SRTM é disponibilizado numa grelha de latitude e

longitude tendo como *datum* horizontal o WGS84 e como *datum* vertical o EGM96, tendo sido projetada para o sistema de referência ITRF93-UTM e optado por uma resolução final de 80 metros.

A área mínima considerada para produção de escoamento (Flowaccumulation) foi de 200 células ($200 \times 80 \times 80 = 1,28 \text{ km}^2$), sendo a base para a definição da rede de drenagem das bacias hidrográficas. Os cálculos foram realizados com o programa informático ArcGIS da ESRI.

O procedimento hidrológico recorre ao conceito do tempo de concentração, determinado em cada afluente da rede hidrográfica até à secção de referência. Assim, para obter as isócronas recorrendo ao procedimento hidrológico nas bacias hidrográficas em análise e considerando válido o pressuposto da velocidade do escoamento ser constante ao longo dos trechos da rede de drenagem, procedeu-se, recorrendo ao programa informático ArcGIS, conforme descrito seguidamente:

1. Identificação, tendo por base a rede de drenagem já definida, de todas as confluências de cursos de água (Fig.4.14-A).
2. Determinação do tempo de concentração em cada uma das confluências, prosseguindo-se para jusante até atingir a secção de referência. No final deste processo o tempo de concentração corresponde ao tempo de concentração determinado para a bacia hidrográfica, definida na estação hidrométrica. Consideraram-se duas fórmulas empíricas, a fórmula de Kirpich (Lencastre e Franco, 1984):

$$t_c = 0,0663 \frac{L_{ca}^{0,77}}{J^{0,385}} \quad (4.46)$$

e a fórmula, que resulta de duas fórmulas a de Kirpich e de Kerby (1959), proposta por Huggins e Burney (1982, cit. por Matias 2006b):

$$t_c = 0,0663 \frac{L_{ca}^{0,77}}{J^{0,385}} + \frac{\left(\frac{2,2nL_s}{\sqrt{Y/100}} \right)^{0,467}}{60} \quad (4.47)$$

sendo, t_c o tempo de concentração (h), L_{ca} o comprimento do curso de água principal desde a nascente até cada secção da rede hidrográfica selecionada (km), J o declive médio do curso de água principal, Y o declive da bacia hidrográfica (%), L_s o percurso médio do escoamento superficial (m), que Huggins e Burney (1982, cit. por Matias 2006b) truncam acima de 150 m, e n o coeficiente médio de rugosidade de Manning para as encostas da bacia ($\text{s m}^{-1/3}$) (Fig.4.14-B). A fórmula de Kirpich foi desenvolvida pelo SCS a partir dos dados de sete bacias hidrográficas rurais em Tennessee com cursos de água bem definidos e declives compreendidos entre 3 e 10 % (Chow, *et al.*, 1988).

A sua pré-seleção, de entre tantas outras fórmulas possíveis para o cálculo de t_c , relaciona-se com o facto de apenas depender de características dos cursos de água facilmente mensuráveis a partir de bases cartográficas disponíveis, o que simplifica o processo de obtenção das isócronas, e de estar associada ao cálculo de caudais de cheia pelo método racional, que é largamente utilizado em bacias hidrográficas com características semelhantes às do presente estudo, isto é, bacias relativamente

pequenas e com uma percentagem significativa de área urbana (Matos, 1983, Costa, 1983, Lencastre e Franco, 1984, Hipólito e Vaz, 2011). A fórmula expressa pela Eq. (4.47) corresponde à soma da fórmula de Kirpich, que Huggins e Burney (1982, cit. por Matias 2006b) consideram aplicável a bacias com área superior a 5 km², só contemplando o escoamento no curso de água, com uma fórmula melhor adaptada a bacias de pequenas dimensões, que apenas contempla o escoamento na encosta. Consideram assim que, ao conjugarem duas fórmulas aplicáveis a bacias de média dimensão e de pequena dimensão, deixa de ser necessária a decisão sempre subjetiva de classificar uma bacia de acordo com a sua área para saber que tipo de forma utilizar.

3. Determinação do tempo de percurso da gota de água, ou tempo de escoamento, desde as secções das confluências referidas no ponto anterior, até à secção de referência, que se obtém pela diferença dos tempos de concentração entre a secção de jusante (secção de referência) e as secções das confluências, situadas a montante (Fig.4.14 - C).
4. Determinação das isolinhas de tempo de escoamento (isócronas), tendo como base os tempos associados a cada confluência, determinados no ponto 3, através da interpolação IDW (*Inverse Distance Weighted*), usando todos os valores das secções e potência entre 3 e 7 (Fig.4.14 - D). Este cálculo recorreu à ferramenta *GEOSTATISTICAL Analyst* do ArcGis e foi selecionada a combinação que minimiza a raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), expresso por:

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} (t_{ei} - t_{oi})^2}{N_x}} \quad (4.48)$$

onde, que t_{ei} é o tempo estimado através da interpolação IDW para a secção i , t_{oi} é o tempo de percurso determinado pelas Eqs. (4.46) e (4.47) (representado os valores observado) para a secção i e N_x é o número total das secções. Os valores obtidos variam entre 0,205 h e 0,998 h. A escolha passou também por uma análise da configuração das isolinhas de forma a não conduzir a opções irrealistas, como formas circulares localizadas no centro da bacia hidrográfica.

5. Seleção da discretização temporal para as isócronas, tendo sido adotado o intervalo horário, que corresponde ao intervalo temporal dos dados de base.
6. Determinação das áreas entre isócronas e do diagrama tempo-área.

Na Fig. 4.14 exemplificam-se as fases da determinação das isócronas pelo procedimento hidrológico.

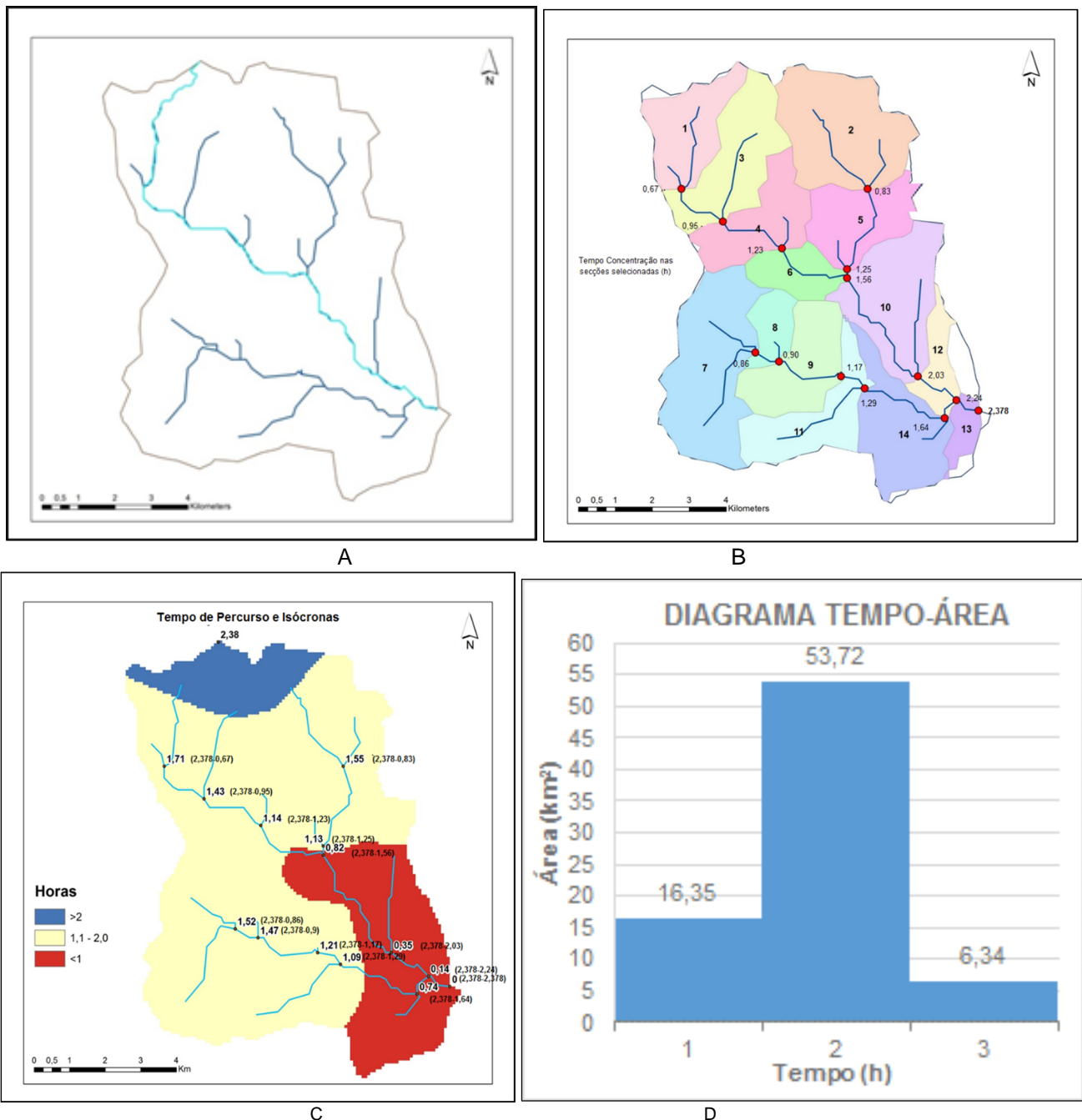


Figura 4.14 – Esquema do processo de determinação das isócronas pelo procedimento hidrológico (exemplo de Ponte Pinhal): A - definição da rede hidrográfica; B - identificação das secções para determinação do tempo de concentração; C - representação das isócronas obtidas pelo IDW a partir da determinação do tempo de percurso até à secção de referência; D - diagrama Tempo-Área.

O procedimento hidráulico caracteriza o escoamento sobre a superfície terrestre e nos cursos de água ou recorre a velocidades médias pré-definidas, que dependem do declive e do tipo de ocupação do solo (Quadro 4.4).

No **Anexo 14** apresenta-se a confrontação, para as sete bacias hidrográficas em análise, das redes hidrográficas resultantes do MET, com célula de 80 m x 80 m, obtidas a partir do SRTM e da cartografia do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE), utilizada e divulgada no portal da APA, I.P. (rede hidrográfica GeoCodificada APA). Verifica-se que a rede hidrográfica utilizada na obtenção das isócronas recorrendo ao procedimento metodológico exposto anteriormente, com área mínima associada à identificação de um curso de água de 200 células, é coincidente e um pouco mais extensa que a rede hidrográfica da cartografia do IGeoE,

com escala equivalente de 1:25 000, com níveis de visualização compreendidos entre 1:100 000 e 1:500 000. A rede hidrográfica construída com uma área mínima de 13 células, baseada no mesmo MET, é bastante mais extensa que a disponibilizada no portal da APA, I.P. associada a uma escala de visualização maior do que 1: 100 000.

Os metadados da rede hidrográfica GeoCodificada APA estão disponíveis no portal da APA, I.P. (<http://sniamb.apambiente.pt/Home/Default.htm>). As escalas de visualização são definidas pelo serviço WMS (*Web Map Service*), que define até que escala é possível visualizar a informação. A escala 1:100 000 é a usualmente utilizada para análise regional, enquanto as escalas menores (entre 1:100 000 a 1:500 000) são aplicadas para análise à escala nacional e, portanto para bacia de maior dimensão.

Quadro 4.4 - Velocidades médias (m s^{-1}) aproximadas, para cálculo do tempo de percurso do escoamento (adaptado de Chow, *et al.*, 1988).

Descrição do curso de água	Declive (%)			
	0 - 3	4 - 7	8 - 11	≥ 12
Zonas onde não estão definidos cursos de água (zonas de encosta)				
Zona de floresta	0-0,457	0,457-0,762	0,762-0,991	>0,991
Zona de Pastagem	0-0,762	0,762-1,067	1,067-1,295	>1,295
Zona Agrícola	0-0,914	0,914-1,372	1,372-1,676	>1,676
Urbanizado	0-2,591	2,591-4,115	4,115-5,182	>5,182
Cursos de água				
Canais bem definidos	Determinado pela aplicação da fórmula de Manning			
Canais naturais mal definidos	0-0,610	0,610-1,219	1,219-2,134	>2,134

O procedimento hidráulico adotado calcula a velocidade de escoamento nos cursos de água e à superfície do terreno em função das condições hidráulicas de escoamento, da rugosidade da superfície do leito e da superfície do terreno e do declive do troço do curso de água e da superfície da bacia, e a sua relação é determinada pela fórmula de Manning-Strickler expressa por:

$$v = K_m R_h^{2/3} \sqrt{J_i} \quad (4.49)$$

Sendo, v a velocidade (m s^{-1}), K_m o coeficiente de Manning-Strickler ($\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$), R_h o raio hidráulico, rácio entre a área da secção líquida e o perímetro molhado (m) e J_i o declive do leito do curso de água (-). O coeficiente de Manning-Strickler ($\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$) é por vezes determinado através do coeficiente de rugosidade de Manning (n), mais frequentemente caracterizado na bibliografia, que é expresso por:

$$K_m = \frac{1}{n} \quad (4.50)$$

Os valores do coeficiente de Manning variam de acordo com a natureza do leito e uso do solo (Quadro 4.5). A ocupação do solo foi obtida recorrendo à Carta de Ocupação do Solo, 2010 (COS2010), com informação à escala de 1:25 000, tendo sido efetuada uma relação entre esta e a ocupação e uso do solo segundo CORINE Land Cover (2006), com escala 1:100 000, para a qual existe informação, em diversa bibliografia, sobre o

coeficiente de Manning e a ocupação do solo. Com estas relações procedeu-se à atribuição dos coeficientes de Manning às classes da COS2010.

Quadro 4.5 - Coeficientes de Manning - n (adaptado de McCuen, 1996, Chow, 1988, Usul e Yilmaz, 2002).

Descrição do uso do solo	Código do CORINE	$n (m^{-1/3} s)$			
		Van der Sande, 1959 (cit. por Chow, 1988) e Sande, <i>et al.</i> (2003)	McCuen (1998)	Usul e Yilmaz (2002)	Adotado
Massa de água e cursos de água naturais	5, 511, 512 e 522	0,03	0,033-0,028	-	0,03
Floresta (<i>shrubland</i> ou matagal)	18	0,2	0,8-0,2	0,6	0,6
Floresta arbustiva densa	-			-	0,8
Pastagens (*)	231	0,259	0,41-0,15	0,24	0,259
Pastagens naturais (Pradaria)	321	0,1	0,13		0,1
Lavoura tradicional	211	0,127	0,19-0,09	0,17	0,12
Zona agrícola	212	0,12	0,05-0,04		
Zonas aluvionares	331	0,12	0,017	-	0,12
Zonas urbanizadas	111, 112 e 114	0,2-0,05	0,025-0,011	-	0,075
Incultos	-	-	-	0,01	0,01
Pousio	241	0,12	0,045	-	0,12
Vinha	221	0,20-0,15	-	-	0,15
Culturas permanentes (zona agrícola)	-	0,12	-	-	0,12
Povoamentos (eucaliptos, sobreiros ou outras folhosas e pinheiros e outras coníferas)	41, 43, 244	0,20	-	0,15	0,20
Olival	223	0,15	-	-	0,15

Legenda: (*) Não utilizado por não existir nas bacias hidrográficas.

A partir da rede hidrográfica procedeu-se ao cálculo dos declives das várias células do MET das bacias hidrográficas. Nas bacias com declives próximos de zero o tempo de percurso tende para o infinito (“efeito do declive mínimo”), sendo evitável ao adotar um limiar mínimo para os declives próximos de nulos, tendo sido adotado um valor de 0,005 (0,5 %). Liu, *et al.*, (2003) testaram três limiares, 0,01, 0,05 e 0,1 %, tendo verificado que o caudal máximo e o tempo para o pico decrescem, ligeiramente, para os menores declives e o tempo de percurso aumenta. Esta alteração terá sempre impacto significativo no tempo de escoamento, mas a sua definição impede que haja nas células velocidades de escoamento nulas e tempos de escoamento infindáveis.

A determinação do raio hidráulico (R_h) recorreu a duas metodologias: Usul e Yilmaz (2002) e Liu, *et al.* (2003). Em ambas as metodologias o menor valor de raio hidráulico está associado ao escoamento à superfície do terreno (escorrência), não sendo escoamento ocorrido em curso de água. As metodologias utilizadas não necessitam que se efetue uma classificação da ordem dos cursos de água, isto é, pode-se implementar um procedimento automático em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) sem ser necessário identificar o grau de ramificação da rede hidrográfica para associar a um determinado valor de raio hidráulico, pois, em ambas as metodologias, o relevante é a área de drenagem definida em cada secção da bacia hidrográfica.

Usul e Yilmaz (2002) propõem um raio hidráulico para o escoamento sobre a superfície do terreno e um conjunto de raios hidráulicos em função da dimensão expectável da secção dos cursos de água, consoante a dimensão

da área hidrográfica que drenam, expressa pelo número das células responsáveis pela formação do escoamento (função *Flowaccumulation* do ArcGis). A metodologia foi aplicada a uma bacia hidrográfica de 950 km², com informação topográfica de 1:25 000. Usul e Yilmaz (2002) relacionam os valores dos raios hidráulicos com classes definidas pelo número de células que contribuem para o escoamento. Estas classes são definidas considerando dois modelos de elevação do terreno, um com precisão de 10 m e outro de 30 m, aos quais é possível associar a dimensão da área da bacia hidrográfica, cujos limites superiores das classes de diferenciação dos raios hidráulicos estão associados, respetivamente, a áreas de 3,500 e 3,15 km².

Face ao exposto anteriormente, foram efetuadas algumas adaptações ao MET adotado no presente estudo, visando compatibilizá-lo com a metodologia preconizado por Usul e Yilmaz (2002). Numa primeira fase alterou-se o número de células mínimas para definição de uma rede hidrográfica, tendo sido adotado o número de 13 células, que corresponde a uma área mínima de drenagem de 0,083 km² (Fig. 4.15). O valor obtido resulta da aplicação da equação potencial resultante do ajustamento entre o número de células para produzir escoamento e o tamanho da célula, tendo-se selecionado a função matemática que permite obter uma rede hidrográfica com uma área mínima para identificação de um curso de água próxima e ligeiramente inferior ao considerado para obter uma rede hidrográfica construída a partir de uma célula de 30 m x 30 m (Usul e Yilmaz, 2002).

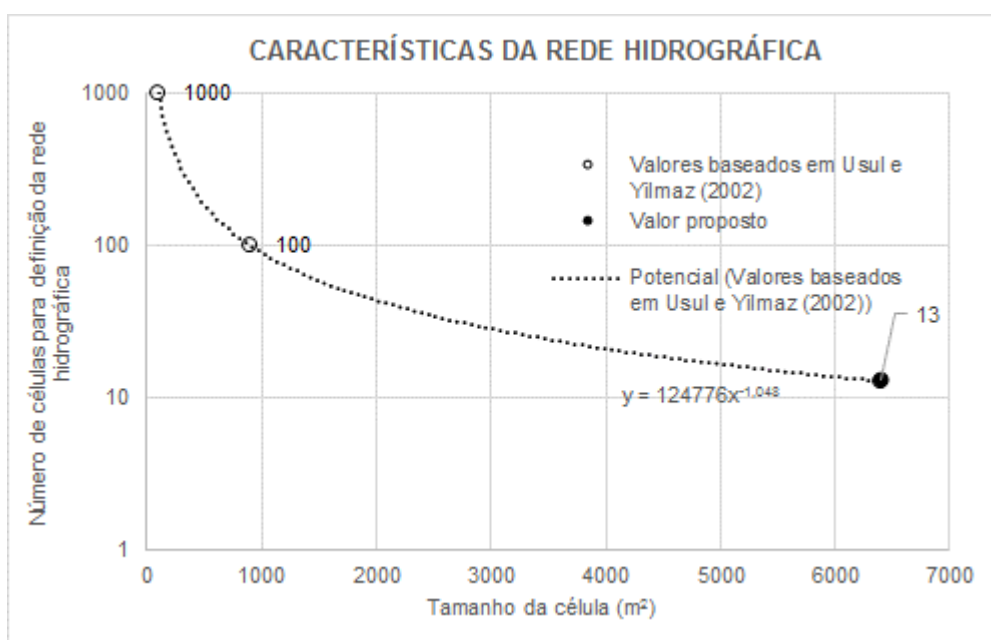


Figura 4.15 – Definição do número de células mínimas para a definição da rede hidrográfica em função do tamanho das células.

Na segunda fase, reajustaram-se os limiares das classes a associar aos raios hidráulicos propostos por Usul e Yilmaz (2002) (Quadro 4.6), que serão aplicados às bacias em análise, as quais abrangem áreas com dimensões compreendidas entre 10 e 100 km². Estes novos limiares foram obtidos pelo produto entre o número de células base (13) e o quociente entre o número de células consideradas nos limiares das classes e o número de células que define a rede hidrográfica (100), ambos baseados no MET de 30 m por 30 m (Quadro 4.6). Estes limiares em conjunto com a área mínima para construção da rede hidrográfica (valores ligeiramente menores aos propostos com MET de 30 m por 30 m) poderiam permitir criar melhores condições, sem a desvirtuar, para aplicar esta metodologia a bacias hidrográficas com dimensões entre 10 e 100 km².

Quadro 4.6 – Limites das classes de células acumuladas e valores de raio hidráulico propostos por Usul e Yilmaz (2002).

Mínimo = 10 m x 10m x 1000 células acumuladas (0,10 km ²)	Mínimo = 30 m x 30 m x 100 células acumuladas (0,09 km ²)	Mínimo = 80 m x 80 m x 13 células acumuladas (0,083 km ²) (MET do presente estudo)	R _h (m) (Usul e Yilmaz, 2002)
E scorrência			0,001
1 000 - 5 000	100-500	13 - 64	0,04
5 000-15 000	500-1 500	64-191	0,08
15 000 - 35 000	1 500-3 500	191 - 448	0,12
>35 000	>3 500	>448	0,25

Liu, *et al.* (2003) apresentaram uma expressão matemática para determinar o raio hidráulico em função da área de drenagem a montante da célula (secção), definida por:

$$R_h = a_1 A_d^{b_1} \quad (4.51)$$

sendo, a_1 e b_1 constantes e iguais a 0,10 e 0,50, A_d a área de drenagem a montante da célula (km²) e R_h raio hidráulico (m), que, considerando os valores das constantes, resulta num raio hidráulico mínimo associado à escorrência superficial de 0,005 m. Liu, *et al.* (2003) construíram uma rede de drenagem a partir de um MET digital de 50 m por 50 m, considerando 10 o número de células mínimas para definir a rede hidrográfica (área de 0,025 km²). Visando permitir comparar os resultados com a metodologia de Usul e Yilmaz (2002), foi utilizado o MET de 80 m por 80 m e considerando uma área mínima para definição da rede hidrográfica de 0,083 km² (13 células). Segundo estes mesmos autores, as constantes indicadas estão associadas a um caudal com período de retorno de 2 anos e a uma bacia hidrográfica de 96,8 km². Uma vez que as bacias hidrográficas em análise têm áreas menores (exceto a bacia hidrográfica definida em Ponte Zambujal), foi efetuado um ajustamento à equação original de forma a abranger toda a área da bacia hidrográfica em análise (Quadro 4.7), para que os raios hidráulicos obtidos associados às estações hidrométricas tivessem valores próximos da unidade, conforme proposto por Liu, *et al.* (2003), resultando, considerando o MET adotado, um raio hidráulico mínimo de escorrência superficial entre 0,006 m e 0,008 m. A aplicação das constantes resultantes do ajustamento para áreas mínimas de 0,025 km² resulta em raios hidráulicos mínimos de escorrência superficial equivalentes a Liu, *et al.* (2003), logo inferiores a 0,03 m como indicado por Schröder (2007) e superiores a 0,001 indicado por Usul e Yilmaz (2002).

Complementarmente, para as secções das estações hidrométricas estimaram-se os respetivos raios hidráulicos, considerando que o escoamento preenche totalmente os seus perfis transversais do leito encaixado (Quadro 4.8). Estes raios hidráulicos consideraram a informação geométrica apresentada no **Anexo 6**. Utilizando estes valores procedeu-se a um novo ajustamento à Eq. (4.51) para cada secção e obtiveram-se as novas constantes (Quadro 4.7).

Sabendo que o raio hidráulico aumenta com a magnitude do evento de cheia, poder-se-á simular a velocidade de escoamento considerando um maior raio hidráulico na secção da bacia hidrográfica em análise. Liu, *et al.* (2003) propõem os raios hidráulicos de 0,5, 1,0 e 1,5 m para a secção de referência, associados respetivamente a cheias com período de retorno de 0,5, 2 e 10 anos, enquanto o raio hidráulico mínimo é constante e igual a 5 mm. A dimensão dos valores dos raios hidráulicos depende da magnitude da cheia mas, também, da dimensão

da bacia hidrográfica e do regime do escoamento verificado na secção. As considerações destes autores permitem inferir, face à maior magnitude dos raios hidráulicos estimados para cada uma das secções (Quadro 4.8) e não avaliando a influência das áreas das bacias hidrográficas em análise e do seu regime do escoamento na secção de jusante, que os caudais potencialmente associados aos raios hidráulicos estimados correspondem a cheias com períodos de retorno superiores a 2 anos. Por outro lado, a partir da equação da Fig. 4.16 é possível estimar que o raio hidráulico unitário corresponderá a um caudal de cerca de $10,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sendo inferior aos máximos estimados pelas curvas de vazão.

Quadro 4.7 – Constantes ajustadas da Equação 4.51.

Estação hidrométrica SNIRH	Área da bacia hidrográfica (km ²)	Raio hidráulico na secção de referência igual à unidade		Raio hidráulico na secção de referência associado ao perfil transversal do leito encaixado	
		a ₁	b ₁	a ₁	b ₁
Quinta das Camilas	10,4	0,200	0,688	0,232	0,703
Estação Agronómica Nacional	37,5	0,128	0,567	0,230	0,615
Laveiras	33,2	0,133	0,577	0,262	0,645
Senhora da Rocha	41,4	0,125	0,559	0,213	0,601
Ponte Zambujal (Liu, <i>et al.</i> , 2003)	99,1	0,100	0,500	0,100*	0,500*
Ponte Pinhal	77,6	0,106	0,516	0,185	0,552
Colares	32,3	0,134	0,579	0,261	0,646

Legenda: * - Estação atualmente não existente e sem identificada sua localização, utilizados os coeficientes propostos por Liu, *et al.* (2003).

Schröder (2007) considerou, baseado numa cartografia com resolução de 25 m, um valor de raio hidráulico para a superfície terrestre e dois para secções retangular associadas aos cursos de água de 1ª e 2ª ordem. Assume que os cursos de água de 1ª ordem têm uma secção com largura de 1 m e altura de 0,3 m, enquanto os cursos de 2ª ordem estão associados a uma largura de 2 metros e altura de 0,5 m. No Quadro 4.8 indicam-se os raios hidráulicos propostos por Schröder (2007) e os maiores raios hidráulicos obtidos a partir das medições de caudal nas várias estações hidrométricas, associado às medições realizadas entre 2011 e 2016, que correspondem a caudais compreendidos entre 0,084 a $1,748 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Aos raios hidráulicos estimados para cada secção da estação hidrométrica associou-se a ordem do curso de água, classificada segundo Strahler e tendo como base a rede hidrográfica utilizada para a determinação das isócronas com procedimento hidrológico. Verificou-se que os raios hidráulicos estimados nas várias estações hidrométricas são menores do que os propostos por Schröder para os cursos de água com igual número de ordem. Por outro lado, os raios hidráulicos estimados a partir do limite superior da secção transversal do leito encaixado são substancialmente superiores aos propostos por Schröder (2007) e aos determinados a partir das medições de caudal, o que significa que estes raios hidráulicos representam caudais e condições hidráulicas substancialmente diferentes.

Na Fig. 4.16 apresenta-se um gráfico com a relação entre os raios hidráulicos e os caudais medidos nas sete estações hidrométricas, que estão na base dos dados incorporados no quadro anterior, sendo de realçar que esta relação descreve uma amostra que abrange caudais de reduzida magnitude. Representam-se, também, os raios hidráulicos propostos por Schröder, cujos caudais associados foram estimados pelo inverso da expressão matemática indicada na mesma figura. A confrontação entre as grandezas dos valores dos raios hidráulicos associados às secções do leito normal das estações hidrométricas não revela uma relação bem definida com a dimensão da bacia hidrográfica, o que poderá estar relacionado com a alteração das secções pela ação humana.

Quadro 4.8 – Valores de raio hidráulico propostos por Schröder (2007) e obtidos com base nas medições de caudal e determinados considerando a geometria das secções das estações hidrométricas.

Número de ordem dos cursos de água		R_h (m)				Características da secção do leito normal (estimadas a partir do limite superior da secção transversal do leito encaixado)			
		Escurrência	1ª Ordem	2ª Ordem	3ª Ordem	Tipo de secção	Largura (m)	Altura (m)	R_h (m)
Schröder (2007)		0,03	0,188	0,333	-	-			
Estações hidrométricas	Quinta das Camilas	-	-	0,181	-	Trapezoidal	6,12; 9,46	2,30	1,20
	Estação Agronómica Nacional	-	-	0,220	-	Retangular	9,18	4,00	2,14
	Laveiras	-	-	0,262	-	Retangular	13,46	4,00	2,51
	Senhora da Rocha	-	-	-	0,580	Retangular	16,91	2,61	1,99
	Ponte Zambujal	-	-	-	0,265	-	-	-	-
	Ponte Pinhal	-	-	-	0,407	Composta (trapezoidal e retangular)	4,15; 6,75; 11,45	1,00 e 3,93	2,08
	Colares	-	-	0,164	-	Retangular	12,77	4,00	2,46

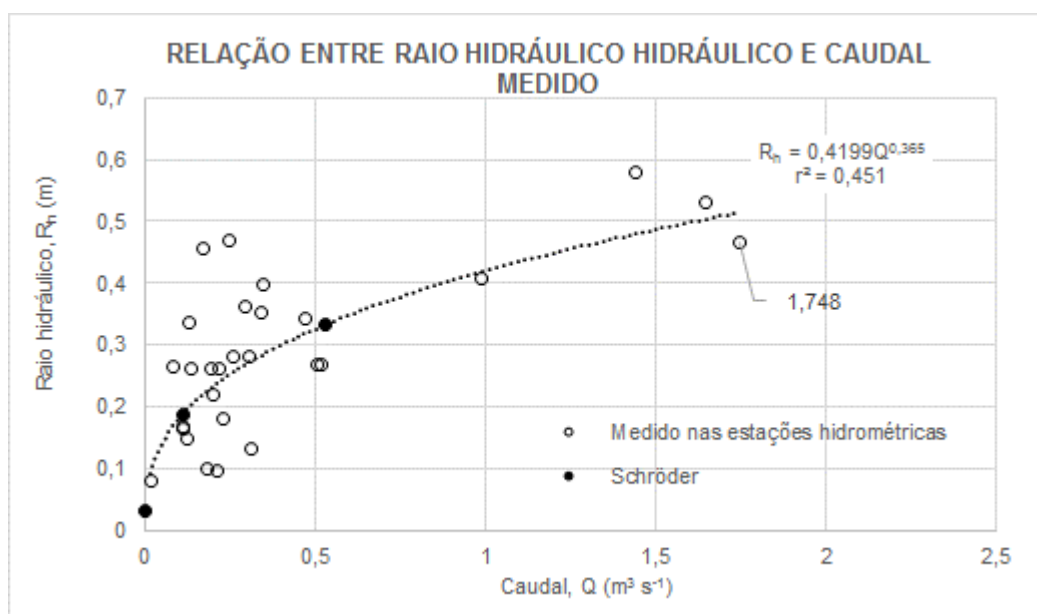


Figura 4.16 – Relação entre o raio hidráulico e os caudais medidos.

A Fig. 4.16 evidencia que os raios hidráulicos medidos e os propostos por Schröder (2007) são da mesma ordem de grandeza e estão associados a pequenos caudais para as bacias em análise, pois estes correspondem a caudais específicos que variam entre 0,0008 e 0,0422 m³ s⁻¹ km⁻². Estes raios hidráulicos estão, também, associados a baixos níveis hidrométricos considerando a amplitude de validade das curvas de vazão (**Anexo 5** e Quadro 2.11), pelo que não serão utilizados na determinação das isócronas.

Assim, foram obtidos dois conjuntos de velocidades de escoamento em cada célula da bacia hidrográfica, e recorrendo ao “Mapa de Aspetos” (direção de fluxo), construído no ambiente ArcView, com base no MET, foi possível definir o percurso dentro de cada célula. No mapa de aspeto estão representadas os oito sentidos de fluxo (Fig. 4.17). No caso do geoprocessamento, este sentido é representado pelo caminho preferencial do escoamento em cada célula (Maziero, *et al.*, 2009). Considerando o MET do presente estudo, o percurso será

realizado ora na vertical ou na horizontal, com distâncias de 80 m, ou na diagonal, com comprimento de 113,1371 m.

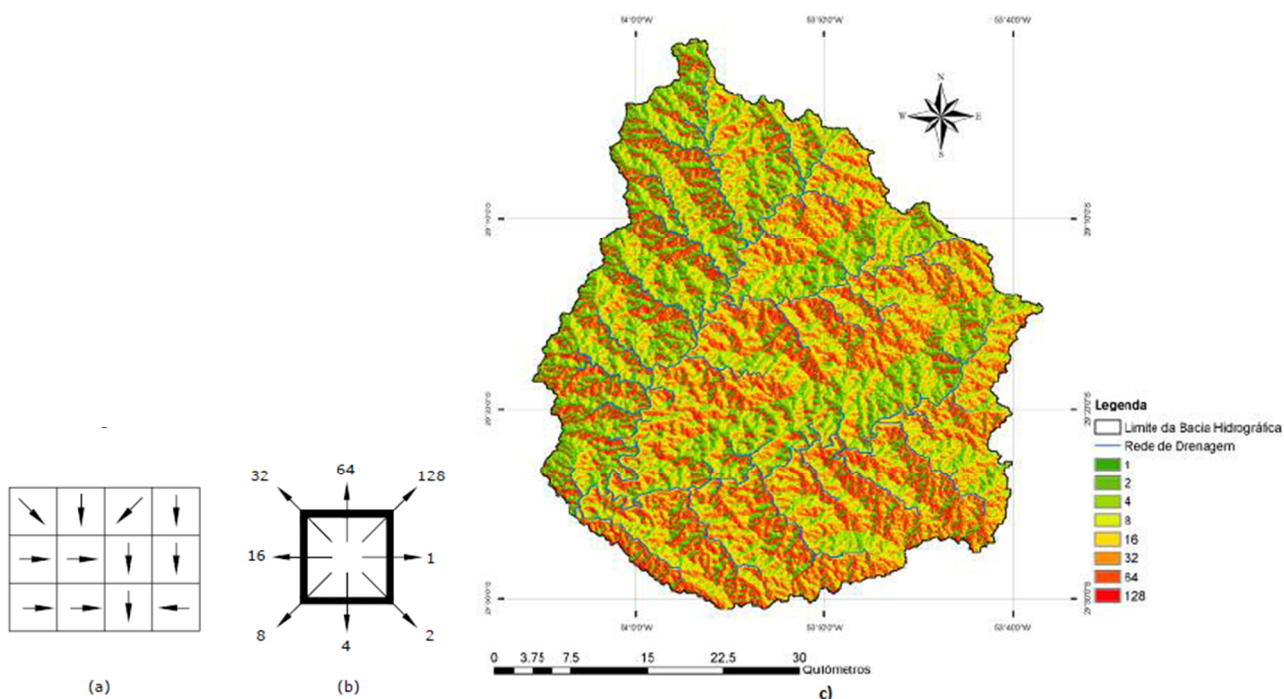


Figura 4.17 – a) Representação esquemática de um mapa de aspetos; b) Oito sentidos de fluxo possíveis; c) Mapa de aspetos (adaptado de Maziero, et al., 2009).

Conhecendo os comprimentos dos percursos, obtidos no mapa de aspetos, e as velocidades em cada célula, determina-se o tempo de percurso e a direção de fluxo para cada célula. O tempo de percurso de uma gota caída sobre uma bacia hidrográfica é obtido pela soma de cada tempo em cada célula, ao longo do percurso do fluxo, calculada com a função *GRID Flowlength*, do programa ArcGIS (Dervos, 2006 e Schroder, 2007). A definição de classes do tempo de percurso permitiu obter uma grelha de isócronas. O diagrama tempo-área resulta da quantificação das áreas entre isócronas adjacentes.

O método do hidrograma unitário de Clark não indica limites, inferior ou superior, de áreas para a sua aplicabilidade⁷, não lhe estando associado uma definição própria de tempo de concentração da bacia hidrográfica, o qual depende do método utilizado para determinar as isócronas. Nesta análise são determinadas isócronas e os respetivos diagramas tempo-área, baseados nos procedimentos hidrológicos e hidráulicos acima expostos, e estimados os coeficientes de armazenamentos médios (K) obtidos pela análise dos acontecimentos hidrometeorológicos.

Em conclusão, neste estudo são utilizados diversos processos de determinação de isócronas permitindo obter vários hidrogramas de Clark.

⁷ Teoricamente será aplicável sempre que a área das isócronas seja suficientemente pequena para que cada uma possa ser modelada pelo método do hidrograma unitário.

4.1.3.6. Hidrogramas unitários sintéticos adimensionais padronizados únicos (adaptação do método SCS)

Recorrendo aos hidrogramas unitários não adimensionais, estimados para cada bacia hidrográfica a partir da análise dos acontecimentos hidrometeorológicos sobrepostos num único acontecimento (alínea 4.1.3.3.), considerando o método de perdas segundo o SCS (alínea 4.1.2.) e o método dos mínimos quadrados com duas restrições na estimativa das ordenadas (4.1.3.2.), determinou-se o hidrograma unitário sintético adimensional padronizado, adaptando a metodologia do hidrograma unitário sintético do SCS (alínea 4.1.3.4.). Assim, as coordenadas dos hidrogramas unitários estimados para cada bacia hidrográfica foram adimensionalizadas dividindo os tempos pelo tempo para a ponta (t_p) e os caudais pelo caudal de ponta do hidrograma unitário (q_p). A partir da média das coordenadas dos vários hidrogramas unitários padronizados (um por cada bacia analisada) determinou-se o hidrograma unitário sintético único.

Determinou-se, igualmente, o hidrograma unitário sintético único triangular adimensional (equivalente ao de Mockus), com os mesmos tempos para a ponta, caudal de ponta e área do hidrograma unitário sintético único, o que implica estimar o seu tempo de base. Assim, foram transformadas as ordenadas do hidrograma unitário sintético único, determinado anteriormente, num valor cumulativo. Para tal, calculou-se o produto entre as diferenças das suas abcissas em instantes temporais consecutivos i , $(t/t_p)_i$ e $(t/t_p)_{i-1}$, e a média das ordenadas, em instantes temporais consecutivos i , $(q/q_p)_i$ e $(q/q_p)_{i-1}$, adicionando a este valor ao do instante temporal anterior, obtendo-se novas ordenadas do hidrograma unitário sintético único inicial. A este hidrograma unitário sintético único corresponde o valor cumulativo final que é equivalente à área do hidrograma unitário adimensional triangular, permitindo estimar o valor de t/t_p associado ao tempo de base deste hidrograma.

Os dois hidrogramas adimensionais anteriormente determinados serão comparados com os dois hidrogramas unitários sintéticos adimensionais padronizados indicados no Quadro 4.2.

Os tempos de concentração e de atraso de cada bacia hidrográfica resultaram da média dos tempos de concentração e de atraso estimados com cada acontecimento hidrometeorológico no processo de determinação dos hidrogramas unitários de cada bacia hidrográfica. Neste contexto, o tempo de concentração corresponde ao tempo compreendido entre o final da precipitação útil e o final do escoamento direto. Para os hidrogramas de escoamento direto com vários caudais de ponta, o tempo de atraso (t_l), definido na alínea 4.1.3.4., determina-se através de uma média ponderada dos vários tempos para os picos, com a expressão:

$$t_l = \frac{\sum_{i=1}^{I_p} t_i q_{pci}}{\sum_{i=1}^{I_p} q_{pci}} \quad (4.52)$$

Sendo, I_p o número de picos de caudal do hidrograma de escoamento direto e t_i (h) o tempo que decorre desde o tempo correspondente ao centroide do hietograma útil até ocorrer o pico de caudal q_{pci} ($m^3 s^{-1}$).

Para verificar a relação expressa pela Eq. (4.20) efetuou-se uma avaliação da relação entre os valores observados médios dos tempos de concentração e de atraso. Deste modo, caso a relação seja a mesma que a

expressa pela Eq. (4.20), proposta pelo SCS (1972,1973), apenas está em análise a relação entre o tempo para a ponta e o tempo de concentração ($t_p = 0,667 t_{cSCS}$).

4.1.3.7. Hidrogramas unitários específicos para cada bacia hidrográfica (adaptação do método SCS com função Gama)

O hidrograma unitário curvilíneo adimensional padronizado segundo a metodologia do SCS, apresentado na alínea 4.1.3.4., foi desenvolvido utilizando técnicas gráficas e não uma expressão matemática (USDA, 2007). Segundo USDA (2007), a forma deste hidrograma unitário adimensional padronizado ajusta-se bastante bem à função de densidade de probabilidade Gama, expressa por:

$$\frac{q}{q_p} = \left(\frac{t}{t_p}\right)^{K_g} e^{-K_g \left(1 - \frac{t}{t_p}\right)} \quad (4.53)$$

sendo, K_g o fator de forma da função densidade de probabilidade Gama e e o número de Euler. Uma vez que a Eq. (4.53) tem apenas um fator, K_g , um valor de K_g produz um único hidrograma unitário adimensional padronizado e, portanto, um fator para a ponta único. O fator para a ponta é calculado a partir das ordenadas do hidrograma unitário adimensional padronizado. Assim, a partir dos hidrogramas unitários padronizados (um por cada bacia analisada) ajustou-se a função Gama expressa pela Eq. (4.53) com a determinação do fator de forma da função (K_g), resultante da minimização da Soma dos Quadrados das Diferenças (SQD) expressa por:

$$\min SQD = \min \sum \left(\frac{q}{q_p} - Q_{qs} \right)^2 \quad (4.54)$$

sendo, Q_{qs} o valor simulado da relação q/q_p (-). Deste modo, determina-se o valor de K_g característico do hidrograma unitário de cada bacia hidrográfica. Após este ajustamento, será transformado este novo hidrograma unitário adimensional padronizado em hidrograma unitário não adimensional mediante o produto dos tempos pelo tempo para a ponta (t_p) e dos caudais pelo caudal de ponta (q_p). Estes hidrogramas unitários específicos são os que serão incorporados no processo de modelação precipitação-escoamento.

Simultaneamente, os ajustamentos dos hidrogramas unitários observados para cada bacia hidrográfica à função Gama, por forma a obter os hidrogramas unitários curvilíneos específicos, implica a determinação do valor de K_g e obriga a assegurar o cumprimento do princípio da conservação da massa, isto é, o volume do hidrograma unitário de cada bacia hidrográfica terá que ser equivalente ao volume do seu hidrograma unitário específico (V_q), sendo expresso por:

$$V_q = e^{K_g} K_g^{-K_g} \Gamma(K_g) \quad (4.55)$$

sendo, $\Gamma()$ a função Gama.

4.1.3.8. Hidrograma unitário sintético curvilíneo para a região

A definição de um hidrograma unitário sintético, baseado na metodologia do SCS e na função Gama, implica a determinação da melhor relação entre as características fisiográficas das bacias hidrográficas (variáveis independentes, x_i) e as características hidrológicas que descrevem a sua forma (variáveis dependentes y_i).

A relação entre estas variáveis pode ser estabelecida através de um modelo multiplicativo:

$$y_i = c_0 x_1^{c_1} x_2^{c_2} \cdots x_w^{c_w} \quad (4.56)$$

em que w representa o número de variáveis independentes a considerar. Este modelo pode ser parametrizado através da regressão linear múltipla aplicada aos logaritmos (base decimal) das variáveis (Viessman e Lewis, 1996, e Chapra e Canale, 1985):

$$\log y_i = \log c_0 + c_1 \log x_1 + c_2 \log x_2 + \cdots + c_w \log x_w \quad (4.57)$$

sendo, y_i a variável dependente (K_g , t_b , q_p ou t_p/t_b), x_i as variáveis independentes (A , A_u , Y , L_s , L_{ca} , ou J) e c_i os coeficientes associados às variáveis independentes.

As características hidrológicas determinadas são o fator de forma da função (K_g), o caudal de ponta do hidrograma unitário (q_p), o tempo para a ponta (t_p), o tempo de base (t_b) e a razão do tempo para a ponta e o tempo de base (t_p/t_b). As características fisiográficas utilizadas foram a área da bacia hidrográfica (A), o comprimento do curso de água principal (L_{ca}), o declive médio do curso de água principal (J), o declive médio da bacia hidrográfica (Y), a percentagem de área urbana (A_u) e o comprimento médio do escoamento superficial (L_s). Com exceção das últimas duas características, as restantes foram determinadas no capítulo 2 (Quadro 2.1). O percurso médio de escoamento superficial corresponde à distância média que a água da chuva tem de percorrer desde o ponto de queda na bacia até ao curso de água mais próximo (Matias, 2006b). Neste estudo, a determinação do L_s foi efetuado recorrendo ao ArcGIS, tendo como base o MET e a função *PathDstRios*, conforme procedimento descrito em Matias (2012b). A percentagem de área urbana (A_u) foi estimada considerando a informação da Carta de Ocupação do Solo, 2010 (COS2010), à escala de 1:25 000, designada como tecido urbano - *Settlements*. A A_u corresponde, nesta análise, à porção da bacia hidrográfica considerada impermeável.

A identificação das variáveis independentes a reter nos modelos, isto é, aquelas que melhor explicam a variável dependente, deve ser efetuada utilizando métodos objetivos de seleção de variáveis, tais como:

- *Forward selection* - o método inicializa-se sem variáveis independentes, as quais são sequencialmente incorporadas uma a uma na equação, com base na sua maior significância estatística (normalmente medida pelo teste F). As variáveis adicionadas não podem ser posteriormente retiradas.

- *Backward elimination* - o método inicializa-se com todas as variáveis independentes na equação, sendo sequencialmente extraídas uma a uma, com base na sua menor significância estatística (normalmente medida pelo teste *F*). As variáveis retiradas não podem ser posteriormente adicionadas.
- *Stepwise regression* – o método integra os procedimentos *forward* e *backward*, isto é, ao adicionar uma nova variável, uma variável incorporada anteriormente pode tornar-se redundante, sendo retirada se provada a sua não significância. Este método é, por vezes, considerado como uma “modificação” do método *forward*.

Em função do método a aplicar, estes terminam quando nenhuma variável esteja em condições de ser acrescentada (*forward* e *stepwise*) ou eliminada (*backward*). Para selecionar as variáveis significativas utilizou-se o teste *F* (comparação entre variâncias).

Neste estudo utilizam-se os métodos *backward elimination* e *stepwise regression* para selecionar as variáveis relevantes para o modelo e a sua implementação foi precedida pela transformação logarítmica de todas as variáveis, seis características fisiográficas e quatro características hidrológicas (Eq. (4.57)).

Embora estes métodos de seleção sejam simples, de ampla divulgação e aplicação e permitirem evitar equívocos com base em conhecimento empírico, deve ponderar-se que os procedimentos podem indicar modelos não necessariamente como ótimos, uma vez que um dado modelo pode não ser detetado devido à restrição de adicionar ou remover apenas uma variável de cada vez (Mantel, 1970).

A aplicação do método *backward elimination* utiliza um procedimento de cálculo implementado no programa *Excel*, desenvolvido neste estudo, baseado nas suas ferramentas estatísticas, nomeadamente, a análise ANOVA associada à determinação da regressão linear múltipla. Assim, este procedimento calcula o coeficiente de correlação, o teste *F* e permite implementar o método de *backward elimination* às séries das características fisiográficas e das hidrológicas. As equações selecionadas para a determinação das quatro características hidrológicas (variáveis dependentes) resultam da identificação da melhor combinação das variáveis independentes avaliando os resultados do teste *F* e do coeficiente de determinação. Este método é implementado considerando o teste *F*, com um determinado nível de significância (α_1), que define o nível de confiança ($1 - \alpha_1$).

Para determinar as características fisiográficas mais relevantes (variáveis independentes) para a estimativa das características hidrológicas dos hidrogramas (variáveis dependentes) estimam-se estatísticas associadas às relações lineares entre os valores das séries das características fisiográficas e hidrológicas das bacias hidrográficas. As estatísticas aplicadas são o coeficiente de correlação, *r* (Eq. (4.58a) para regressões lineares simples ou Eq. (4.58b) para regressões lineares múltiplas) e o teste *F* (Eq. (4.59a) para comparação entre duas amostras ou Eq. (4.59b) para regressões lineares) expressos por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(N_x - 1)S_x S_y} \quad (4.58a)$$

$$r = \frac{S_{\hat{y}}}{S_y} \quad (4.58b)$$

$$\text{teste } F = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} \left(\hat{y}_i - \bar{y} \right)^2}{g_{ln}}}{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} \left(y_i - \hat{y}_i \right)^2}{g_{ld}}}, \quad \hat{y}_i = c_0 + c_1 x_1 + \dots + c_w x_w \quad (4.59a)$$

$$\text{teste } F = \frac{S_x^2}{S_y^2} \quad (4.59b)$$

sendo, N_x o tamanho das séries das características fisiográficas, x_i , e hidrológicas, y_i (que corresponde ao número de bacias hidrográficas em análise), \hat{y}_i o valor estimado da característica hidrológica a partir de uma regressão linear, \bar{x} e \bar{y} a média dos respectivos valores, S_x , S_y , $S_{\hat{y}}$ e os seus desvios-padrão. Considerando o exposto anteriormente, neste exercício os valores das características fisiográficas, hidrológicas e respetivas estatísticas são expressos em logarítmicos. As médias e os desvios-padrão são determinados por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} x_i}{N_x} \quad e \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} y_i}{N_x} \quad (4.60)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} (x_i - \bar{x})^2}{N_x - 1}} \quad e \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} (y_i - \bar{y})^2}{N_x - 1}} \quad (4.61)$$

Geralmente, a determinação da Eq. (4.57) recorre ao método dos mínimos quadrados, permitindo o ajustamento a uma curva que minimiza as diferenças entre os valores observados e estimados (mediante a identificação do mínimo do somatório dos quadrados dos resíduos, designado, também, por erros),

Quando o valor calculado da estatística do teste F , para um determinado nível de significância, é superior ao valor crítico ($F_{\text{crítico}}$, g_{ln} , g_{ld}), tabelado (Fig. 4.18), rejeita-se a hipótese de ausência de regressão, isto é, o teste é significativo. Assim, o modelo tem capacidade explicativa significativa. Uma variável aleatória contínua x tem uma distribuição F de *Snedecor* com g_{ln} e g_{ld} ($F_{g_{ln}, g_{ld}}$), se a sua função densidade de probabilidade for expressa por:

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{g_{ln} + g_{ld}}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{g_{ln}}{2}\right)\Gamma\left(\frac{g_{ld}}{2}\right)} \left(\frac{g_{ln}}{g_{ld}}\right)^{\frac{g_{ln}}{2}} \frac{x^{\frac{g_{ln}}{2}-1}}{\left(1 + \frac{g_{ln}}{g_{ld}}x\right)^{\frac{g_{ln}+g_{ld}}{2}}}, \quad 0 < x < \infty, g_{ln}, g_{ld} = 1, 2, 3, 3 \quad (4.62)$$

sendo, $\Gamma()$ a função Gama.

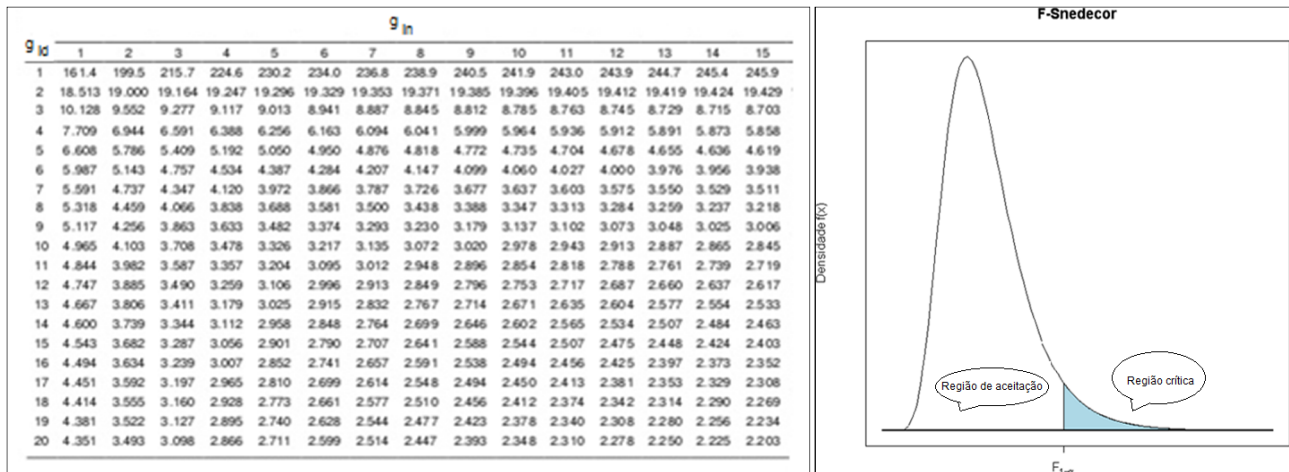


Figura 4.18 – Limites unilaterais da distribuição de F de Fisher-Snedecor para o nível de significância de 0,05, e função de densidade de probabilidade de F de Fisher-Snedecor.

Na determinação do teste F é necessário definir o respetivo nível de significância (α_1), que determina o nível de confiança ($1-\alpha_1$), identificar o número de variáveis independentes utilizadas na estimativa (l), e calcular o número de graus de liberdade da regressão (g_{ln}) e dos resíduos ou dos erros (g_{ld}) definidos por:

$$g_{ln} = l \quad (4.63a)$$

$$g_{ln} = N_x \quad (4.63b)$$

$$g_{ld} = N_x - l \quad (4.64a)$$

$$g_{ld} = N_x - 1 \quad (4.64b)$$

As Eqs. (4.63a) e (4.64a) aplicam-se na formulação do teste F através da Eq. (4.59a), enquanto as Eqs. (4.63b) e (4.64b) aplicam-se na formulação do teste F através da Eq. (4.59b). O teste F visa comparar a variância entre amostras, permitindo avaliar a adequabilidade do modelo de regressão linear e, assim, formula-se a hipótese nula (H_0), isto é, não há correlação entre as variáveis. Portanto, define-se por:

- Se o valor da estatística do teste F cair na região crítica, rejeita-se a hipótese nula, isto é, rejeita-se H_0 (há regressão entre variáveis, pois teste F é superior a $F_{crítico}$).
- Se o valor da estatística do teste F cair na região de aceitação, aceita-se a hipótese nula (teste- F inferior ao $F_{crítico}$).

As estatísticas anteriormente apresentadas foram aplicadas de forma a avaliar a relevância de uma determinada característica fisiográfica para a estimativa de uma determinada característica hidrológica associada à definição do hidrograma unitário.

Embora se disponha de um reduzido número de bacias hidrográficas, para determinar as características fisiográficas mais relevantes para estimar as características hidrológicas dos hidrogramas, aplicou-se o método *stepwise regression*. O método inicializa-se sem variáveis independentes, as quais são sequencialmente incorporadas uma a uma na equação, com base na sua maior significância estatística, normalmente medida pelo teste F , e respetivo nível de significância atingido, p (Nau, R. 2017, cit. por <https://people.duke.edu/~rnau/411home.htm>). Basicamente, o teste verifica se a constante associada à variável

independente considerada é estatisticamente não nula. Quanto maior o valor da estatística F e menor o valor de p , maior interesse há em incluir a variável no modelo. Assim, em cada etapa, entra no modelo a variável com maior valor de F (desde que superior a um valor previamente definido, F_{in} , a que corresponde um nível de significância α_1). Quando já não há variáveis para entrar, verifica-se se, entre as variáveis incorporadas, alguma apresenta um valor de F abaixo do limite considerado para a saída de variáveis, F_{out} , a que corresponde um nível de significância α_2 . Em caso afirmativo, dentro delas, é retirada aquela com menor valor de F .

O processo termina quando deixar de haver variáveis para retirar ou para incluir, de acordo com os limites previamente definidos. Embora se use com frequência $F_{in} = F_{out}$, há autores (Nau, 2017, cit. por <https://people.duke.edu/~rnau/411home.htm>) que aconselham $F_{in} \geq F_{out}$, para evitar entrar em ciclo.

A aplicação do método *stepwise regression* poderá recorrer a diversas aplicações desenvolvidas para Excel, em que este método de regressão é feito automaticamente (*Real Statistics Resource Pack software for Excel 2013*, Release 5.1, Copyright (2013 – 2017) Charles Zaiontz, <http://www.real-statistics.com> ou Kamakura's Analytic Tools for Excel, <http://wak2.web.rice.edu/>).

Deste modo, identificaram-se as dependências entre as variáveis, tendo sido selecionadas as que maiores valores revelam de correlação e melhores significâncias apresentam (de forma isolada ou em conjunto com outras variáveis). Considerando as características fisiográficas que melhor se relacionam com as características hidrológicas, determinaram-se as expressões matemáticas que permitem estimar o hidrograma unitário através das características fisiográficas.

Após a aplicação dos métodos de seleção das variáveis, determinam-se os coeficientes de determinação (r^2) que medem a proporção da variação total da variável dependente que é explicada pela variação das variáveis independentes. Este valor varia entre zero e um e quanto mais próximo da unidade maior a relação entre as variáveis. Todavia, um elevado r^2 não significa necessariamente uma boa adequação do modelo, dado que a inclusão de variáveis pouco significativas no modelo podem elevar o valor deste coeficiente, situação que ficou ultrapassada devido à aplicação de métodos de seleção de variáveis significativas.

4.1.3.9. Considerações finais

Em relação ao exposto e à forma como foram implementadas as metodologias selecionadas são de realçar os seguintes aspetos:

- Os hidrogramas unitários determinados para as bacias hidrográficas selecionadas no capítulo 2 resultam de registos simultâneos hidrométricos e udográficos contínuos, com discretização horária, sendo que as bacias têm dimensões dentro do intervalo aconselhável para aplicar o método do hidrograma unitário.
- O método dos mínimos quadrados foi adotado para resolver a equação da convolução discreta visando a determinação dos hidrogramas unitários, com duas restrições: ordenadas obrigatoriamente positivas e o volume de escoamento do hidrograma unitário igual ao volume de precipitação útil sobre a bacia

hidrográfica (princípio da conservação da massa). Nesta última restrição é assegurada que o somatório das ordenadas do hidrograma unitário adimensional é igual à unidade.

- Os declives médios das bacias hidrográficas a analisar são bastante inferiores a 30 % e na generalidade as áreas são inferiores a 52 km², sendo possível aplicar o hidrograma unitário sintético curvilíneo do SCS sem infringir as condições da sua aplicabilidade. A exceção está associada às bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Ponte Pinhal (na ribeira de Loures) e Ponte Zambujal (rio Trancão), situadas na bacia hidrográfica do rio Trancão, com áreas respetivamente de 78 e 99 km². Contudo, a determinação do hidrograma unitário não será efetuada para a Ponte Zambujal pois não tem registos de caudal. Para a bacia de Ponte Pinhal poder-se-á considerar a sua divisão, autonomizando a bacia definida por um dos afluentes de cada bacia hidrográfica, caso os resultados não sejam satisfatórios.
- As bacias hidrográficas a analisar têm áreas compreendidas entre 10 e 100 km², tendo dimensão adequada para aplicar o hidrograma unitário sintético de Temez.
- A relação entre o intervalo de discretização da precipitação, D , e o tempo de concentração da bacia, t_c , expressa pelas Eqs. (4.18) e (4.29), para aplicação dos hidrogramas unitários sintéticos do SCS e de Temez, respetivamente, implica que, para $D = 1$ h, as bacias hidrográficas deverão ter tempos de concentração superiores a 7,5 h e a 5 h, respetivamente. No método do SCS este valor aumenta para 12,3 h, caso se considere o ajustamento do t_{cSCS} ao t_c através da Eq. (4.19). Ora, a determinação do tempo de concentração das sete bacias hidrográficas em análise com as Eqs. (4.20) e (4.27) permite verificar que a Eq. (4.18) nunca é cumprida e que a Eq. (4.29) é apenas cumprida para as bacias definidas em Laveiras, Ponte Pinhal e Ponte Zambujal. Contudo, este requisito poderá ser aferido com a determinação do tempo de concentração observado e com a avaliação dos resultados da sua aplicação.
- Os dois hidrogramas unitários sintéticos únicos (alínea 4.1.3.6.) e o hidrograma unitário sintético curvilíneo para a região (alínea 4.1.3.8.), baseado nas características fisiográficas das bacias analisadas, determinados neste estudo, serão comparados entre si e com os hidrogramas sintéticos de Temez, do SCS e de Mokus (alínea 4.1.3.4.), visando identificar as diferenças.
- Os raios hidráulicos obtidos pelo método de Usul e Yilmaz (2002) são substancialmente menores do que os obtidos pelo método de Liu, *et al.* (2003), sendo que os obtidos por este método são mais próximos dos estimados, mas por excesso, para as secções das estações hidrométricas correspondentes ao perfil transversal do leito encaixado.
- Os raios hidráulicos resultantes do preenchimento total pelo escoamento dos perfis transversais do leito encaixado das secções de referência em análise são maiores que os propostos por Liu, *et al.* (2003) e, segundo estes autores, estes caudais estão associados a períodos de retorno superiores a dois anos. De realçar que esta avaliação não incorpora a influência do regime de escoamento na secção de referência nem a dimensão das bacias hidrográficas.
- O caudal correspondente ao raio hidráulico unitário, nas estações hidrométricas avaliadas, corresponde a um valor medido de cerca de 10,8 m³ s⁻¹ (equação da Fig. 4.16), sendo este valor inferior à média dos caudais de ponta dos hidrogramas analisados neste estudo, com exceção da estação da Quinta das Camilas, onde a média dos caudais de ponta foi de 9,39 m³ s⁻¹.
- As várias isócronas determinadas tendo em consideração as especificidades das bacias hidrográficas em estudo, com abordagem hidrológica e hidráulica, permitem abdicar da utilização da abordagem

incorporada em várias versões do programa informático HEC-HMS (2010) referente ao método de Clark, que consiste na aplicação do diagrama tempo-área pré-definido, dos coeficientes de armazenamento (K) médios obtidos pela análise dos acontecimentos hidrometeorológicos, e do tempo de concentração com definição semelhante à formulação do SCS.

4.2. Determinação de hidrogramas finais nas secções das estações hidrométricas consideradas

4.2.1. Hidrogramas de escoamento direto

Tendo como base as precipitações ponderadas dos acontecimentos pluviosos, obtidas pelo método dos Polígonos de Thiessen, para cada bacia hidrográfica que drena para a secção associada às estações hidrométricas consideradas, e os respetivos hidrogramas de escoamento total, efetuou-se a separação dos componentes dos hidrogramas em escoamentos direto e de base, como descrito na alínea 4.1.1.. Analisaram-se 68 acontecimentos hidrometeorológicos, apresentando-se no Quadro 4.9 a média e o desvio-padrão, por bacia hidrográfica, das seguintes características hidrológicas: caudal de ponta de cheia, caudal de base no instante t_0 , caudal de início de recessão, coeficiente de escoamento (razão entre os volumes de escoamento direto e de precipitação total), constante de exaurimento e tempo de base. Entendeu-se por acontecimento hidrometeorológico o fenómeno de ocorrência de precipitação que provocou uma variação do caudal numa determinada secção de um curso de água. Foram, apenas, considerados os acontecimentos hidrometeorológicos de cuja precipitação resultou um caudal instantâneo superior a $1,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e o coeficiente de escoamento superior a 0,04 e inferior a 1, que indicará existir uma relação entre a precipitação e o escoamento do acontecimento hidrometeorológico, não sendo considerados escoamentos provenientes de eventuais afluentes não resultantes da precipitação (**Anexo 15**).

No **Anexo 15** indicam-se as características hidrológicas acima descritas, associadas a cada acontecimento analisado, para as bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal. A estação hidrométrica de Ponte Zambujal não foi objeto de análise uma vez que não tem associada nenhuma curva de vazão que permita obter os hidrogramas de escoamento. Não foi possível efetuar esta caracterização para a estação hidrométrica de Colares, uma vez que a aplicação da curva de vazão aos níveis hidrométricos registados não permitiu obter caudais (os níveis hidrométricos registados são inferiores ao nível hidrométrico correspondente ao caudal nulo).

O Quadro 4.9 mostra que, com algumas exceções associadas ao caudal de ponta (Laveiras e Senhora da Rocha), caudal de base (Laveiras e Ponte Pinhal) e constante de exaurimento (Laveiras), os valores dos desvios-padrão são inferiores aos valores médios (coeficiente de variação inferior à unidade).

Quadro 4.9 – Características hidrológicas dos hidrogramas totais associadas às estações hidrométricas analisadas (média e desvio-padrão).

Estação hidrométrica do SNIRH	Parâmetros estatísticos	Caudal de ponta, Q_p ($m^3 s^{-1}$)	Caudal de base (Q_{b0}) no instante t_b ($m^3 s^{-1}$)	Caudal de início de recessão Q_r ($m^3 s^{-1}$)	Coefficiente de escoamento, C_e (-)	Constante de exaurimento, α (h^{-1})	Tempo de base, t_b (h)
Quinta das Camilas	Média	9,39	2,00	3,55	0,47	0,04	18,07
	Desvio- padrão	6,19	1,46	2,88	0,25	0,02	9,00
Estação Agronómica Nacional	Média	23,17	1,83	3,08	0,48	0,05	22,31
	Desvio- padrão	13,76	1,56	1,20	0,16	0,04	10,86
Laveiras	Média	18,95	0,48	1,11	0,53	0,06	23,25
	Desvio- padrão	22,92	0,54	1,26	0,28	0,07	8,52
Senhora da Rocha	Média	16,44	0,01	0,10	0,18	0,52	16,83
	Desvio- padrão	33,82	0,01	0,14	0,17	0,40	10,42
Ponte Zambujal	Sem hidrogramas (capítulo 2)						
Ponte Pinhal	Média	31,39	2,20	2,87	0,29	0,05	29,13
	Desvio- padrão	29,92	4,14	2,78	0,18	0,03	10,03
Colares	Não foi possível determinar os caudais						

4.2.2. Hietograma de precipitação eficaz ou útil

Considerando as precipitações ponderadas dos acontecimentos pluviosos, obtidas pelo método dos Polígonos de Thiessen, para cada bacia hidrográfica, que drena para a secção associada às estações hidrométricas consideradas, e os respetivos hidrogramas de escoamento como descrito na alínea 4.1.1. e apresentado na alínea 4.2.1, foram determinadas as perdas, considerando os dois métodos alternativos descritos na alínea 4.1.2. (métodos do SCS e do índice Φ).

Ambos métodos requerem a mesma estimativa das perdas iniciais, seguido da retenção potencial máxima de água no solo da bacia hidrográfica, S (depois convertida em número de escoamento, N), para o método do SCS, e do valor do índice Φ .

A média e o desvio-padrão das características acima referidas apresentam-se no Quadro 4.10. Os mesmos parâmetros, associados a cada acontecimento analisado, indicam-se nas primeiras cinco colunas do **Anexo 16**. Os valores dos desvios-padrão associados às “restantes perdas” (Quadro 4.10) nem sempre são inferiores aos valores médios, sendo que existe o mesmo padrão quando se avalia os valores obtidos para a retenção potencial máxima de água no solo.

Os valores de retenção potencial máxima de água no solo (S) resultam da média dos valores obtidos para cada acontecimento hidrometeorológico analisado por estação hidrométrica. Caso o cálculo de S seja a partir do N calibrado o valor médio obtido é menor.

Quadro 4.10 – Características hidrológicas resultantes da determinação dos hidrogramas de escoamento diretos associadas às estações hidrométricas analisadas (média e desvio-padrão).

Estação hidrométrica do SNIRH	Parâmetros estatísticos	Número de Escoamento, N	Perdas iniciais observadas, I_a (mm)	Restantes perdas		Perdas totais	Retenção potencial máxima de água no solo, S (mm)
		Calibrado	Índice Φ e SCS	Índice Φ , (mm)	Índice Φ , (mm h ⁻¹)	Índice de Φ e SCS (mm)	SCS
Quinta das Camilas	Média	87,64	2,19	12,61	2,04	14,80	44,33
	Desvio- padrão	13,69	1,98	11,35	1,46	11,94	58,85
Estação Agronómica Nacional	Média	90,20	1,71	13,48	1,60	15,19	34,91
	Desvio- padrão	11,75	1,70	18,45	1,70	18,53	60,72
Laveiras	Média	91,64	1,26	9,22	1,25	10,48	24,26
	Desvio- padrão	7,74	0,99	12,08	1,27	12,51	25,29
Senhora da Rocha	Média	72,23	4,08	17,13	2,64	21,21	119,38
	Desvio- padrão	18,98	2,18	19,36	1,71	19,82	101,05
Ponte Zambujal	Sem hidrogramas (capítulo 2)						
Ponte Pinhal	Média	76,58	4,78	20,75	3,11	25,53	94,28
	Desvio- padrão	15,68	4,41	11,94	2,10	13,60	90,68
Colares	Não foi possível determinar caudais						

A média e o desvio-padrão da retenção potencial máxima de água no solo em cada bacia hidrográfica são baseados nos valores de S obtidos através do Número de Escoamento calibrado para cada acontecimento hidrometeorológico. Portanto, o valor indicado no quadro anterior não foi obtido mediante o Número de Escoamento calibrado médio, do qual resulta uma média menor na retenção potencial máxima de água no solo.

As bacias hidrográficas apresentam Números de Escoamento calibrados (N) médios compreendidos entre 72,23 (Senhora da Rocha) e 91,64 (Laveiras), com desvios-padrão de 7,74 (Laveiras) a 18,98 (Senhora da Rocha), o que determina a grande diferença entre as capacidades de armazenamento das bacias hidrográficas (S). Na Fig. 4.19 representam-se as variações dos Números de Escoamento nos vários acontecimentos hidrometeorológicos, nas bacias hidrográficas em análise. Com exceção da bacia hidrográfica definida em Ponte Pinhal e Senhora da Rocha, os Números de Escoamento calibrados médios são superiores aos valores pré- definidos associados a AMC_{II} , sendo o valor médio do Número de Escoamento calibrado em Ponte Pinhal muito próximo do Número de Escoamento inicial (AMC_{II}). As bacias definidas pela estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional e Laveiras apresentam Números de Escoamento calibrados próximos de 90, sendo Laveiras a única situação onde o valor médio calibrado é superior ao Número de Escoamento pré-definido para AMC_{III} . Os Números de Escoamento pré definidos AMC_{II} estão indicados no Quadro 2.1 e a sua conversão em AMC_{III} efetuou-se por aplicação da Eq. (4.8).

Em geral, os desvios-padrão das características hidrológicas de escoamento total e direto são inferiores às médias. A exceção está associada, com maior significado, à retenção potencial máxima de água no solo e às perdas estimadas a partir do índice Φ .



Figura 4.19 – Representação dos vários Números de Escoamento associadas aos acontecimentos hidrometeorológicos para as várias bacias hidrográficas.

As perdas iniciais observadas têm valores bastante inferiores aos que resultariam da aplicação da metodologia do SCS (Fig. 4.20), isto é, são da ordem de 3 % da retenção potencial máxima da água no solo da bacia hidrográfica no início do evento chuvoso, e não 20 %, conforme proposto pela metodologia de cálculo de perdas segundo o SCS (Fig. 4.20). Estão, no entanto, bastante próximas de 5 %, valor considerado atualmente como preferível, como indicado na alínea 4.1.2..

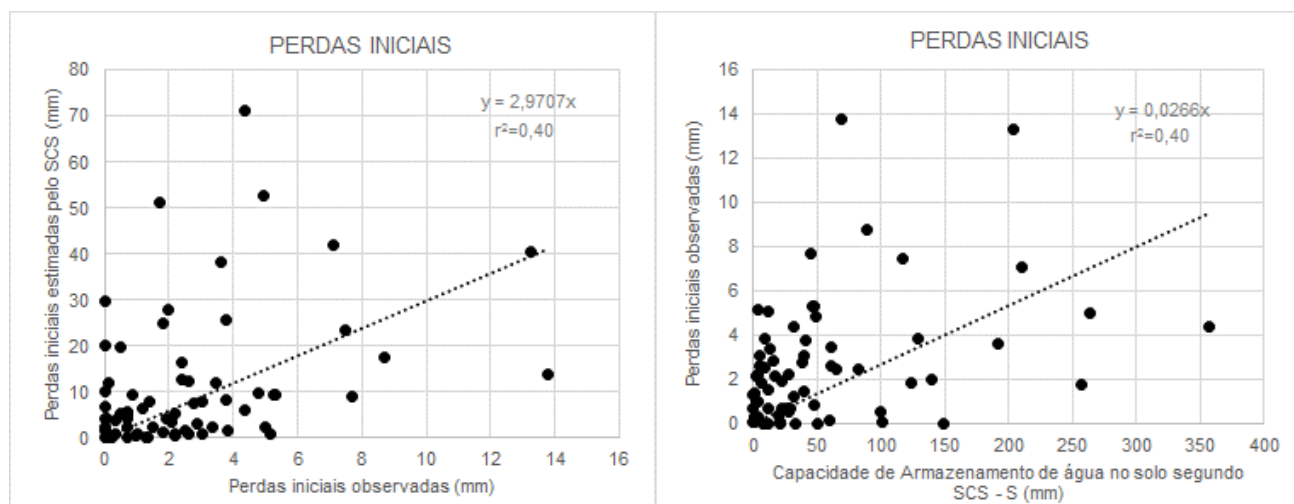


Figura 4.20 – Relação entre as perdas iniciais observadas e as perdas iniciais e a capacidade de armazenamento de água no solo resultantes da aplicação da metodologia do SCS.

As regressões lineares das perdas iniciais estimadas com o método do SCS, aplicação da Eq. (4.5) com o Número de Escoamento calibrado, sobre as perdas iniciais observadas e das perdas iniciais observadas sobre a capacidade de armazenamento de água do solo, aplicação da Eq. (4.7) com o Número de Escoamento calibrado, apresentam coeficientes de determinação (r^2) baixos (cerca de 0,40). Portanto, nas regressões lineares obtidas a variância da variável dependente (perdas iniciais estimadas e observadas e perdas iniciais observadas e capacidade de armazenamento de água no solo) é só explicada em 40 %.

4.2.3. Tempos característicos dos hidrogramas de escoamento direto

Uma vez que se adotaram dois métodos alternativos para o cálculo das perdas durante o acontecimento hidrometeorológico (métodos do SCS e do índice Φ), obtiveram-se dois hietogramas de precipitação útil distintos, o que conduziu a duas estimativas de tempos de concentração e de tempos de atraso.

A média e o desvio-padrão destas características temporais, assim como dos tempos para a ponta e dos tempos de base dos hidrogramas de escoamento direto determinados, quando da separação dos componentes do hidrograma de escoamento total, apresentam-se no Quadro 4.11. Como se pode observar, com a única exceção do tempo de atraso obtido com método de perdas SCS (Laveiras), verifica-se que os valores dos desvios-padrão são sempre inferiores aos valores médios. Os mesmos parâmetros associados a cada acontecimento analisado indicam-se nas últimas 4 colunas do **Anexo 16**.

Quadro 4.11 – Características hidrológicas resultantes da determinação dos hidrogramas de escoamento diretos associadas às estações hidrométricas analisadas (média e desvio-padrão).

Estação hidrométrica do SNIRH	Parâmetros estatísticos	Tempo para a ponta, T_p (h)	Tempo de atraso, t_1 (h)		Tempo de concentração observado, t_c (h)	
			SCS	Índice Φ	SCS	Índice Φ
Quinta das Camilas	Média	6,93	2,71	2,76	4,80	9,20
	Desvio- padrão	5,12	2,49	1,94	3,19	6,75
Estação Agronómica Nacional	Média	7,50	3,08	4,45	6,00	10,69
	Desvio- padrão	5,07	2,60	4,17	2,31	4,88
Laveiras	Média	7,13	3,48	3,97	5,94	9,25
	Desvio- padrão	5,83	3,53	3,00	2,35	4,78
Senhora da Rocha	Média	7,83	1,06	2,17	2,83	9,50
	Desvio- padrão	4,26	0,53	1,47	2,23	5,96
Ponte Zambujal	Sem hidrogramas (capítulo 2)					
Ponte Pinhal	Média	7,87	3,30	5,01	6,53	19,87
	Desvio- padrão	3,87	2,06	2,62	3,72	8,95
Colares	Não foi possível determinar caudais					

4.2.4. Determinação dos hidrogramas unitários observados

Considerando os hidrogramas de escoamento direto “observados” como o resultado da equação da convolução discreta (alínea 4.1.3.2.) dos hietogramas da precipitação útil com os hidrogramas unitários efetuou-se a calibração destes, recorrendo à minimização da soma dos quadrados dos erros da simulação dos caudais, com duas restrições (que asseguram o princípio da conservação da massa e a obtenção de ordenadas positivas). Os hidrogramas unitários observados finais de cada bacia hidrográfica obtiveram-se por aplicação dos métodos gráfico e da sobreposição dos acontecimentos (alínea 4.1.3.3.). Os resultados da aplicação do método gráfico apresentam-se no **Anexo 11**.

No Quadro 4.12 indicam-se os caudais de ponta dos hidrogramas unitários observados finais, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ de escoamento direto por mm h^{-1} de precipitação útil e adimensionais, obtidos com aqueles dois métodos, havendo também a distinção entre os hidrogramas unitários observados obtidos em função do método utilizado para a determinação das perdas nas bacias hidrográficas (SCS ou índice Φ). Os caudais de ponta dos hidrogramas variam entre 0,903 e 7,079 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por mm h^{-1} , associados, respetivamente, às bacias hidrográficas definidas em Quinta das Camilas e em Ponte Pinhal. Nos hidrogramas unitários adimensionais as pontas estão compreendidas entre 0,216 (Ponte Pinhal) e 0,599 (Senhora da Rocha).

Os hidrogramas unitários observados finais obtidos têm caudais de ponta maiores quando utilizado o método de perdas do SCS em alternativa ao método de perdas do índice Φ .

Quadro 4.12 – Caudais de ponta dos hidrogramas unitários observados finais, com dimensões, u_p ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por mm h^{-1}), e sem dimensões, δ_p , associados a cada estação hidrométrica, segundo o método gráfico e de sobreposição dos acontecimentos e para dois tipos de modelação das perdas.

Estação hidrométrica do SNIRH	Método sobreposição			
	Perdas SCS		Perdas índice Φ	
	u_p ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por mm h^{-1})	δ_p (-)	u_p ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por mm h^{-1})	δ_p (-)
Quinta das Camilas	1,146	0,397	0,903	0,313
Estação Agronómica Nacional	4,316	0,414	3,233	0,310
Laveiras	5,420	0,588	4,164	0,451
Senhora da Rocha	6,881	0,599	3,301	0,287
Ponte Zambujal	Não foi possível determinar caudais			
Ponte Pinhal	7,079	0,328	4,653	0,216
Colares	Não foi possível determinar caudais			
Média	4,968	0,465	3,251	0,315

Na Fig. 4.21 representam-se os acontecimentos resultantes da aplicação do método da sobreposição dos vários acontecimentos independentes, para as cinco estações hidrométricas com dados hidrometeorológicos apropriados (com registo de caudais e estes não nulos): Quinta das Camilas, Estação Agronómica, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal. Com base nestes hidrogramas e hietogramas, e considerando os dois métodos de perdas (SCS ou índice Φ), determinaram-se os hidrogramas unitários observados finais.

No Quadro 4.13 indicam-se os tempos característicos destes hidrogramas unitários observados finais. Os valores apresentados neste quadro evidenciam que, geralmente, as menores durações dos tempos para a ponta e dos tempos de base correspondem à aplicação do método de perdas SCS.

Quadro 4.13 – Tempos característicos dos hidrogramas unitários observados finais (h).

Estação hidrométrica do SNIRH	Método sobreposição			
	Tempo para a ponta, t_p		Tempo de base, t_b	
	Perdas SCS	Perdas índice Φ	Perdas SCS	Perdas índice Φ
Quinta das Camilas	2	2	9	15
Estação Agronómica Nacional	2	3	13	20
Laveiras	2	2	9	10
Senhora da Rocha	2	1	4	6
Ponte Zambujal	Não foi possível determinar caudais			
Ponte Pinhal	2	5	18	22
Colares	Não foi possível determinar caudais			
Média	2,0	2,6	10,6	14,6

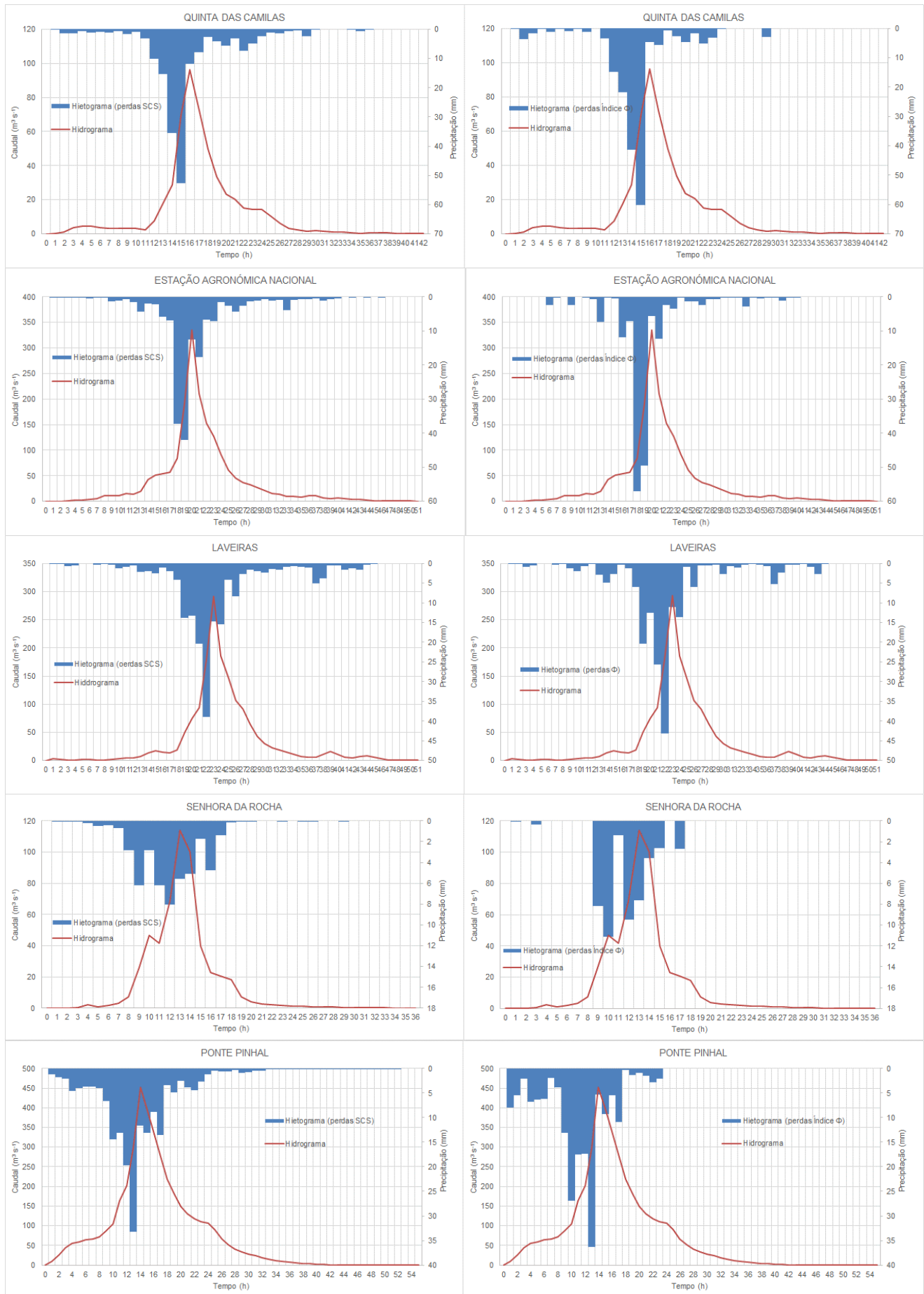


Figura 4.21 – Hidrogramas diretos e hietogramas de precipitação útil resultantes do método da sobreposição dos acontecimentos hidrometeorológicos e com as perdas calculadas com dois métodos alternativos (SCS e índice Φ), associados às estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronômica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.

Na Fig. 4.22 representam-se os hidrogramas unitários observados, finais, obtidos para as cinco estações hidrométricas, pela convolução discreta, com minimização do somatório do quadrado dos erros, aplicando os métodos gráfico e da sobreposição dos acontecimentos hidrometeorológicos e considerando os dois métodos de perdas. Em geral, os hidrogramas unitários observados obtidos pelo método de sobreposição dos acontecimentos antecipam o tempo para a ponta em relação aos hidrogramas unitários obtidos pelo método gráfico (**Anexo 11**).

Uma vez que os dados hidrometeorológicos de base disponibilizados têm amostragem horária os resultados obtidos estão condicionados a esta discretização temporal, sendo os tempos múltiplos da hora.

Em conclusão:

- A resolução da equação da convolução discreta através do método dos mínimos quadrados, incorporando duas restrições, com sobreposição de acontecimentos hidrometeorológicos, conduz a hidrogramas unitários observados finais onde, geralmente, a ponta ocorre mais cedo do que o obtido com o processo gráfico (alínea 4.1.3.3.).
- Os caudais de ponta dos hidrogramas unitários são maiores quando são consideradas as perdas SCS.
- Os hidrogramas unitários observados finais têm durações de base maiores que os tempos de concentração médios observados nas bacias hidrográficas analisadas (alínea 4.2.3.).
- Os tempos de base dos hidrogramas unitários observados finais para cada bacia hidrográfica analisada, considerando as perdas SCS, são geralmente inferiores aos obtidos recorrendo à estimativa das perdas com índice Φ , pois o método de perdas SCS resulta normalmente em hietogramas de precipitação útil de duração superior à obtida com o método do índice Φ (Eq. (4.13)).
- A média do somatório do quadrado dos erros, que suporta a determinação dos hidrogramas unitários observados, foi utilizada para seleccionar o método para estimar as perdas. Considerando as bacias analisadas, foi identificado que o método de perdas SCS é aquele que menor média apresenta, exceto para a bacia em Senhora da Rocha (nesta, a média resultante do método índice Φ é um pouco superior). Face a estes resultados, será adotado o método de perdas SCS no processo de modelação precipitação-escoamento (capítulo 5).

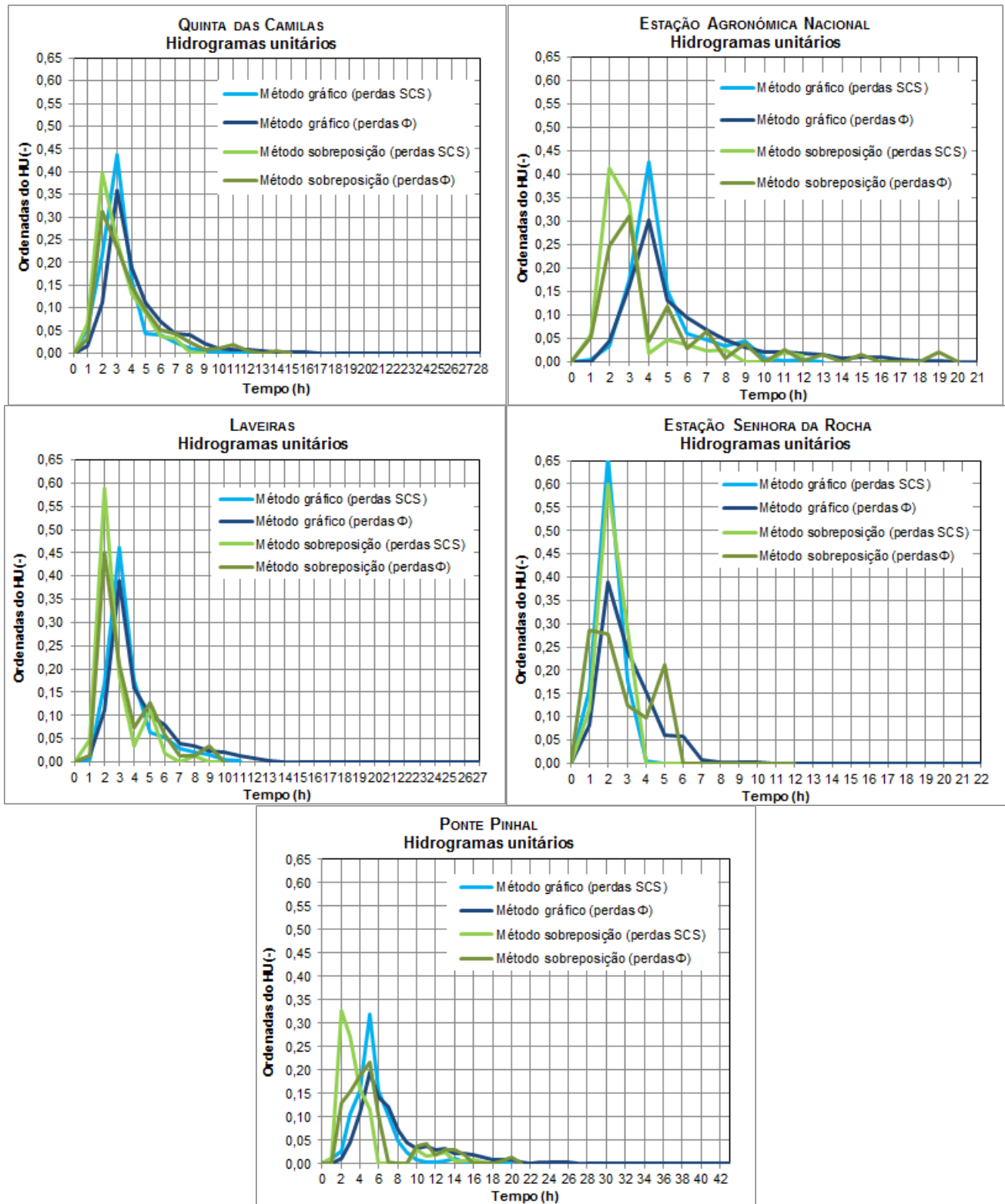


Figura 4.22 – Hidrogramas unitários observados finais, segundo os métodos gráfico e da sobreposição dos acontecimentos hidrometeorológicos para as estações hidrométricas de Quinta da Camilas Laveiras, Ponte Pinhal, Estação Agronómica Nacional e Senhora da Rocha.

4.2.5. Determinação dos hidrogramas unitários de Clark

O mapa das isócronas obtidas pela aplicação dos procedimentos hidrológico e hidráulicos, assim como os diagramas tempo-área a que dão origem, apresentam-se no **Anexo 17**.

A aplicação dos vários processos de cálculo das isócronas, hidrológico (Kirpich e Huggins e Burney) e hidráulico (restantes), conduziu a tempos de concentração diversificados, logo a diferentes diagramas tempo-área, tanto para cada bacia hidrográfica como entre as diversas bacias hidrográficas analisadas (Quadro 4.14).

O método proposto por Usul e Yilmaz (2002) não foi possível aplicar à bacia definida em Quinta das Camilas e a sua aplicação às restantes sete bacias resultou em tempos de concentração compreendidos entre 31 e 65 h, que são bastante superiores aos valores obtidos por aplicação dos outros métodos para determinação das isócronas (Quadro 4.14) e excessivos face à dimensão das bacias hidrográficas em análise (entre 10 e 100 km²). No entanto, a aplicação da metodologia preconizada por Usul e Yilmaz (2002) resulta em tempos de percurso na rede hidrográfica, entre 5,39 e 13,11 h, mais próximos dos tempos de concentração “observados” a partir dos hidrogramas de escoamento direto e dos hietogramas de precipitação útil obtidos com o método do SCS, entre 2,83 e 6,53 h (Quadro 4.11, alínea 4.2.3.), e dos tempos de concentração obtidos por aplicação do método de Temez (1978) (Quadro 4.14). Por outro lado, estes tempos de percurso excessivamente prolongados estarão relacionados pela adoção de raios hidráulicos pequenos, principalmente o raio hidráulico associado à escorrência (0,001 m), que é bastante inferior ao proposto de Liu, *et al.* (2003) (0,005 m).

Face às durações do diagrama tempo-área demasiado elevadas para as sete bacias hidrográficas quando aplicada a metodologia de Usul e Yilmaz (2002), esta não será utilizada para a determinação do hidrograma unitário de Clark e, portanto, não serão calculados os coeficientes de armazenamento, os tempos para a ponta e os caudais de ponta correspondentes.

As durações dos diagramas tempo-área foram condicionadas pela discretização temporal horária dos dados hidrometeorológicos e, por isso, as durações destes, que definem o número de isócronas (linhas de igual tempo de percurso), foram definidas por forma a serem múltiplas da hora. Por este motivo, os tempos associados às bacias hidrográficas são valores “arredondados”: múltiplos da hora e superiores às durações associadas ao curso de água principal. Os dados e os diagramas foram sincronizados obtendo-se o coeficiente de armazenamento de cada acontecimento e a média de todos os acontecimentos hidrometeorológicos de cada bacia hidrográfica.

Quadro 4.14 – Tempo de concentração, t_c , e duração total do diagrama tempo-área, consoante o método de determinação das isócronas.

Tempos de concentração, t_c (h)		Estação hidrométrica do SNIRH						
		Quinta das Camilas	Estação Agronómica Nacional	Laveiras	Senhora da Rocha	Ponte Zambujal	Ponte Pinhal	Colares
SCS	Bacia agregada Eqs. (4.17) e (4.20)*	1,58	3,12	3,66	2,98	2,98	2,85	2,45
Temez	Bacia agregada Eq. (4.27)*	2,47	5,55	5,96	4,76	7,37	5,53	3,97
Kirpich	Bacia agregada Eq. (4.46)*	1,06	2,95	3,05	2,32	4,28	2,68	1,89
Hidrológico - Kirpich Eq. (4.46)	Bacia hidrográfica composta por sub-bacias	1	3	3	3	4	3	3
	Curso de água principal	0,96	2,77	2,95	2,31	3,79	2,38	2,21
Hidrológico - Huggins e Burney Eq. (4.47)	Bacia hidrográfica composta por sub-bacias	2	4	4	3	5	3	3
	Curso de água principal	1,15	3,25	3,32	2,63	4,16	2,64	2,84
Hidráulico Usul e Yilmaz (2002)	Bacia hidrográfica composta por sub-bacias	-	65	37	33	31	42	35
	Curso de água principal	-	13,11	6,84	5,39	8,78	6,15	7,61
Hidráulico Liu, <i>et al.</i> (2003) com R_h final unitário Eq. (4.51)	Bacia hidrográfica composta por sub-bacias	5	5	4	4	4	7	4
	Curso de água principal	1,13	1,90	1,70	1,63	3,01	6,01	1,33
Hidráulico Liu, <i>et al.</i> (2003) com R_h final adaptado à secção Eq. (4.51)	Bacia hidrográfica composta por sub-bacias	5	4	3	3	-	5	3
	Curso de água principal	1,03	1,27	1,03	1,12	-	4,18	0,83
Tempos concentração observados médios (Perdas SCS)		4,80	6,00	5,94	2,83	-	6,53	-

Legenda:* Baseado numa rede hidrográfica com resolução de 90 m (subcapítulo 2.1.) e as restantes numa rede hidrográfica com resolução de 80 m (alínea 4.1.3.5.).

A duração total dos diagramas tempo-área (tempo de concentração da bacia hidrográfica), obtida a partir da aplicação dos métodos hidrológico (Kirpich e Huggins e Burney) ou hidráulico (Liu, *et al.*, 2003, duas versões), varia entre duas e sete horas, as quais estão associadas, respetivamente, à menor bacia hidrográfica (Quinta das Camilas) e à maior bacia hidrográfica (Ponte Pinhal) (Quadro 4.14 e **Anexo 17**). Entre os vários tempos de concentração resultantes das metodologias para obtenção do diagrama tempo-área, o que apresenta tempo total mais próximo dos tempos de concentração observados é o resultante da aplicação do método Hidráulico Liu, *et al.* (2003) com raio hidráulico final unitário. O objetivo foi selecionar o diagrama tempo-área que estaria mais próximo, em termos de duração total, do tempo de concentração médio resultante da análise dos acontecimentos hidrometeorológicos, onde foi considerado o método de perdas de SCS. Não havendo dados hidrometeorológicos noutras secções a montante da secção de referência, definida na estação hidrométrica, pressupõe-se que o diagrama tempo-área selecionado descreve a bacia hidrográfica. Na Fig. 4.23 apresentam-se os diagramas tempo-área para as sete bacias hidrográficas, considerando os quatro métodos citados anteriormente.

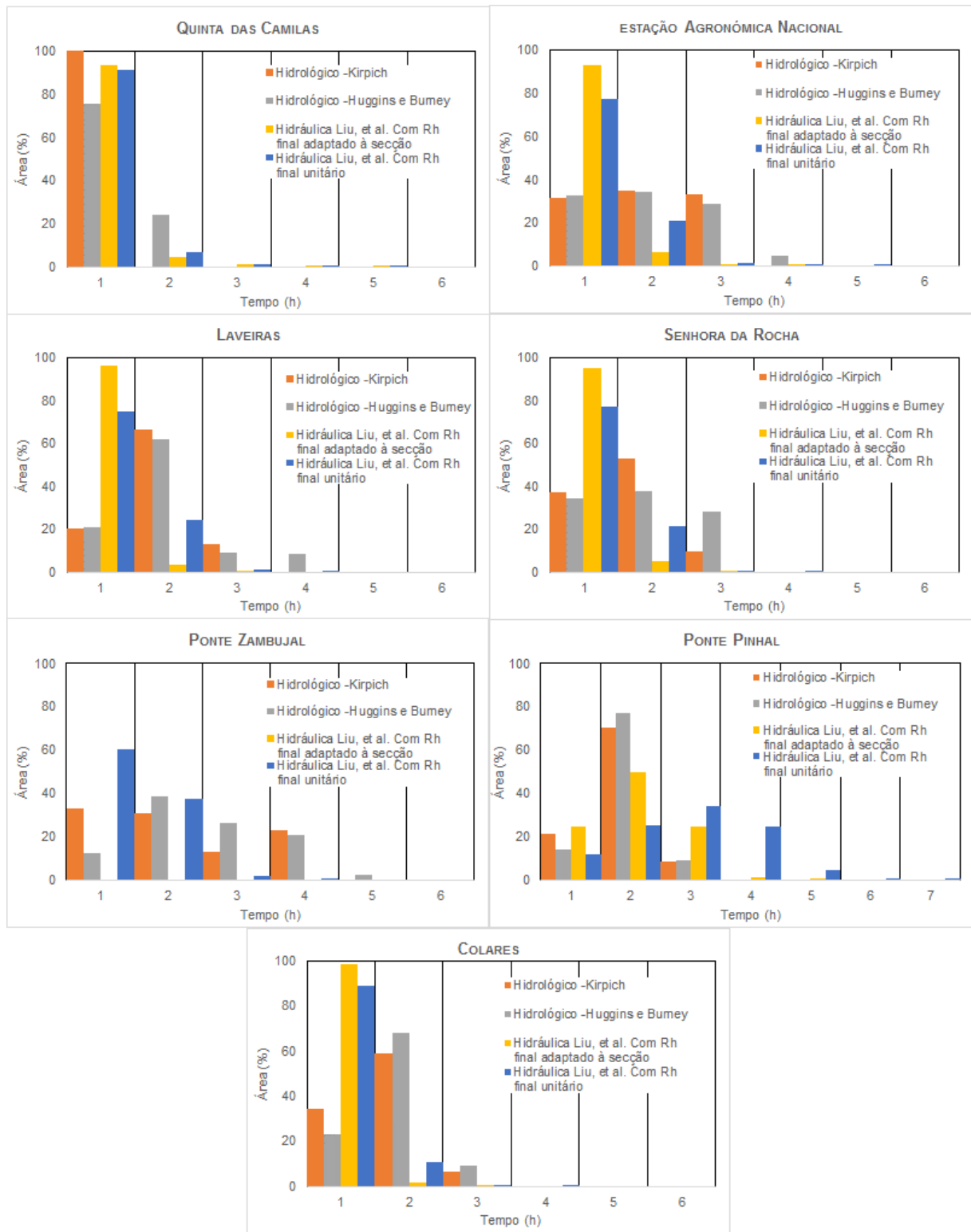


Figura 4.23 – Diagramas tempo-área para as sete bacias hidrográficas considerando aplicação dos métodos hidrológico (Kirpich e Huggins e Burney) ou hidráulico (Liu, et al., 2003, duas versões).

No Quadro 4.15 apresentam-se os tempos para a ponta, os coeficientes de armazenamento e os caudais de ponta resultantes da calibração do hidrograma unitário de Clark associado aos diferentes métodos de determinação do diagrama tempo-área e métodos de perdas. Como as estações de Ponte Zambujal e de Colares não têm hidrogramas, só foi possível determinar o diagrama tempo-área e o tempo de concentração. O tempo para a ponta corresponde, normalmente, ao tempo para o maior valor da ordenada do diagrama tempo-área, a exceções correspondem à ocorrência da ponta no instante temporal seguinte ao valor máximo do

diagrama tempo-área, podendo este fenómeno estar relacionado com a discretização temporal dos dados (horários). Os hidrogramas unitários agregados de Clark foram obtidos recorrendo ao processo de cálculo exemplificado nos Quadros 4.3.

Quadro 4.15 – Tempo para a ponta (t_p), constante de reservatório ou coeficiente de armazenamento médio (K) e caudal de ponta (q_p) dos hidrogramas unitários agregados de Clark, associados aos dois métodos de determinação de perdas e aos vários processos de cálculo das isócronas.

Métodos de determinação de HU, segundo Clark	Características hidrológicas	Estação hidrométrica do SNIRH									
		Quinta das Camilas		Estação Agronómica Nacional		Laveiras		Senhora da Rocha		Ponte Pinhal	
		Perdas SCS	Perdas Índice Φ	Perdas SCS	Perdas Índice Φ	Perdas SCS	Perdas Índice Φ	Perdas SCS	Perdas Índice Φ	Perdas SCS	Perdas Índice Φ
Hidrológico - Kirpich Eq. (4.46)	Tempo para a ponta (h)	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2
	Coeficiente de armazenamento (h)	3,371	5,091	1,587	2,561	1,421	2,089	0,600	2,115	2,730	4,896
	Caudais de ponta dos hidrogramas unitários ($m^3 s^{-1}$ por mm h^{-1})	0,789	0,546	2,966	2,397	3,630	2,790	5,863	3,316	5,590	3,451
Hidrológico - Huggins e Burney Eq. (4.47)	Tempo para a ponta (h)	2	2	3	3	2	2	2	3	2	2
	Coeficiente de armazenamento (h)	2,834	4,320	1,573	2,563	1,307	1,921	0,486	1,854	2,711	4,864
	Caudais de ponta dos hidrogramas unitários ($m^3 s^{-1}$ por mm h^{-1})	0,703	0,530	2,804	2,290	3,648	2,836	4,291	2,964	5,732	3,500
Hidráulico Liu, <i>et al.</i> (2003) com R_h final unitário Eq. (4.51)	Tempo para a ponta (h)	1	1	1	2	1	2	1	2	3	4
	Coeficiente de armazenamento (h)	3,138	4,752	2,835	4,194	2,338	3,047	1,214	3,144	1,256	3,340
	Caudais de ponta dos hidrogramas unitários ($m^3 s^{-1}$ por mm h^{-1})	0,763	0,528	2,451	1,836	2,437	2,028	5,210	2,464	5,698	3,754
Hidráulico Liu, <i>et al.</i> (2003) com R_h final adaptado à secção Eq. (4.51)	Tempo para a ponta (h)	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
	Coeficiente de armazenamento (h)	3,190	4,827	3,181	4,717	2,785	3,615	1,475	3,702	2,730	4,498
	Caudais de ponta dos hidrogramas unitários ($m^3 s^{-1}$ por mm h^{-1})	0,770	0,534	2,672	1,885	2,724	2,174	5,547	2,608	4,623	3,388

Considerando os quatro métodos de determinação do hidrograma unitário agregado de Clark associados à obtenção das isócronas, verifica-se que os valores indicados no Quadro 4.15 relativos aos métodos de estimativa das perdas SCS e índice Φ têm o mesmo padrão de comportamento para as várias estações bacias hidrográficas, assim, os caudais unitários decrescem, os coeficientes de armazenamentos sobem e os tempos para a ponta mantêm-se. A exceção a este padrão de subida ou descida associa-se ao tempo para a ponta nos hidrogramas unitários cujo valor é igual para os dois métodos de perdas, retirando os valores resultantes da aplicação do método hidráulico Liu, *et al.* (2003) com R_h final unitário, onde este tempo aumenta quando se considera o método de perda índice Φ em detrimento do SCS (excluindo a bacia definida em Quinta das Camilas) e em Senhora da Rocha (método hidrológico - Huggins e Burney).

Os tempos para a ponta dos hidrogramas unitários agregados finais de Clark obtidos são diversificados, variando entre 1 e as 4 h, sendo geralmente menores quando os hidrogramas são obtidos recorrendo aos hietogramas úteis e hidrogramas de escoamento direto através do método de perdas SCS e às isócronas determinadas através da proposta de Liu, *et al.* (2003) com R_h final adaptado à secção (Quadro 4.15). Estes tempos para a ponta coincidem, geralmente, com o maior valor da ordenada do diagrama tempo-área, havendo casos em que o tempo para a ponta ocorre no instante seguinte.

Os coeficientes de armazenamento obtidos pela média dos coeficientes associados a cada acontecimento hidrometeorológico, variam entre 0,486 e 5,091 h, ou entre 1,214 e 4,827 h, quando as isócronas são determinadas respetivamente pelo método hidrológico ou hidráulico, sendo geralmente maiores os obtidos recorrendo às isócronas determinadas hidraulicamente (Quadro 4.15).

Os caudais dos hidrogramas unitários agregados finais de Clark obtidos estão compreendidos entre 0,530 e 5,863 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por mm h^{-1} ou entre 0,528 e 5,698 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por mm h^{-1} , consoante se considera a aplicação do método hidrológico ou hidráulico, respetivamente. As diferenças de amplitude de valores não são significativas, numa mesma bacia, sendo que os mínimos e os máximos se registam na mesma bacia independentemente do método aplicado, menor em Quinta das Camilas (perda com índice Φ) e maior em Senhora da Rocha e Ponte Pinhal (perdas com SCS).

Geralmente, os maiores coeficientes de armazenamento e menores caudais de ponta são observados na menor bacia hidrográfica analisada, definida na estação da Quinta das Camilas, e os menores coeficientes de armazenamento e maiores caudais de ponta nas estações de Senhora da Rocha ou Ponte Pinhal. Os maiores e menores tempos para a ponta são obtidos, respetivamente, na maior bacia hidrográfica analisada (Ponte Pinhal) e na menor bacia hidrográfica (Quinta das Camilas).

É relevante assinalar, novamente, que a resolução horária dos dados hidrometeorológicos de base condiciona os resultados obtidos associados aos tempos para a ponta e de base e caudais dos hidrogramas unitários agregados finais de Clark. Na Fig. 4.24 representam-se os hidrogramas unitários agregados finais de Clark, cujas isócronas foram obtidas pelos processos hidrológico e hidráulico. Os tempos de base variam entre 4 h (Senhora da Rocha) e 25 h (todas as bacias, exceto Laveiras cuja duração máxima é de 24 h), sendo todas as maiores durações associadas ao método de perdas segundo índice Φ e as mínimas ao método do SCS. Os tempos de base correspondem ao instante em que os caudais são inferiores a $0,001 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, tendo sido considerado como duração máxima as 25 horas.

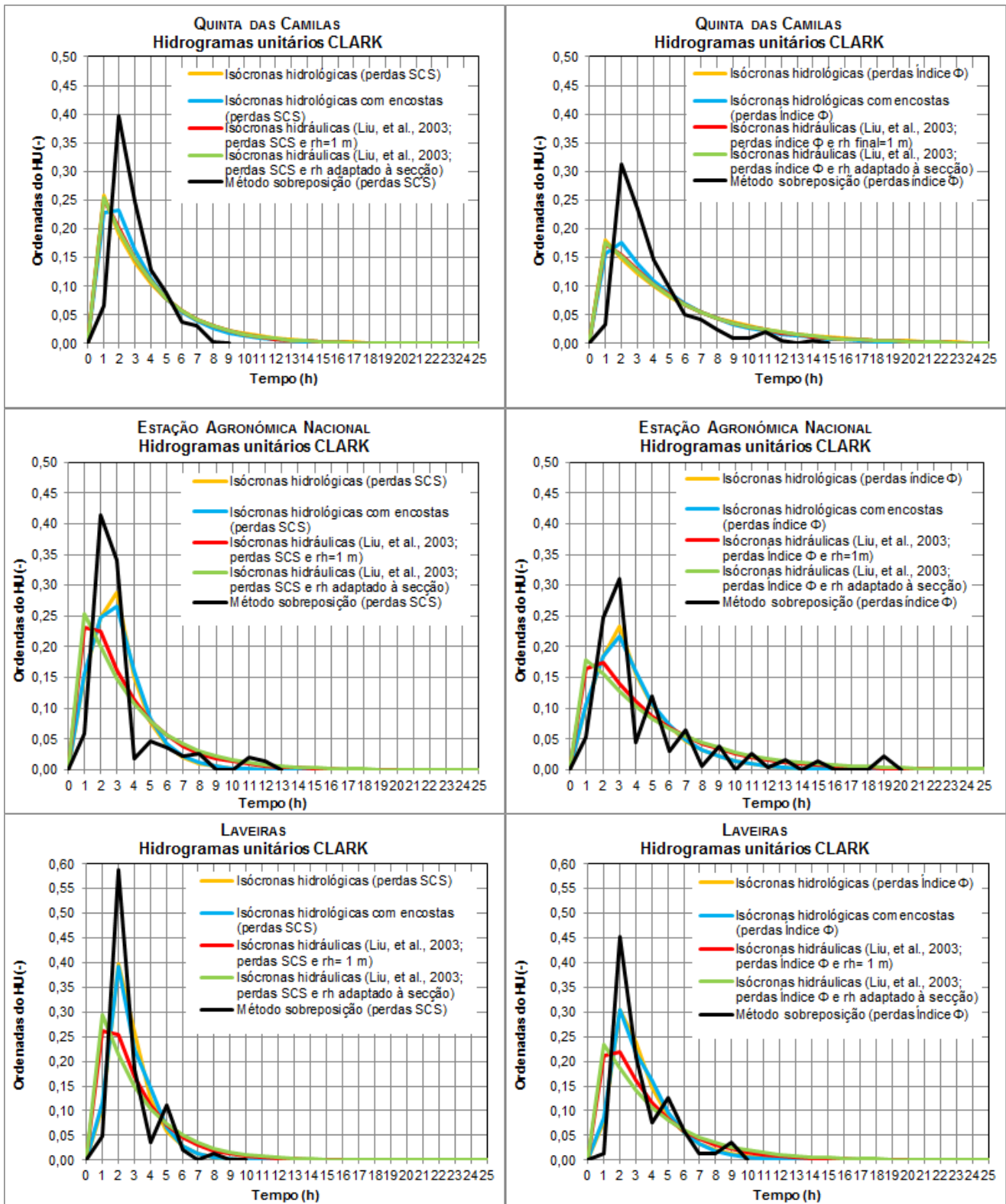


Figura 4.24 – Comparação dos hidrogramas unitários agregados finais de Clark, para as estações hidrométricas de Quinta das Camilas Laveiras, Ponte Pinhal, Estação Agronómica Nacional e Senhora da Rocha (continua).

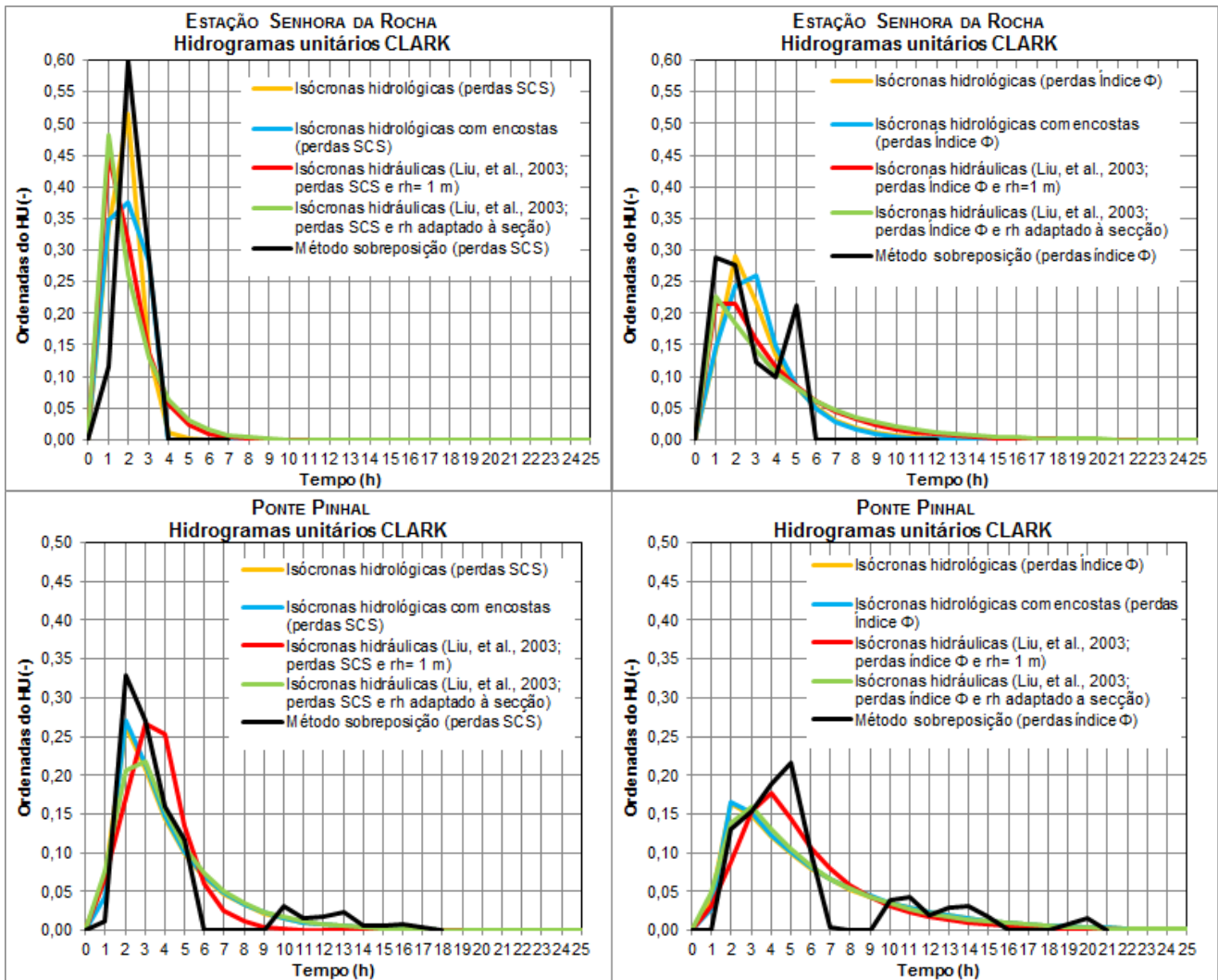


Figura 4.24 – Comparação dos hidrogramas unitários agregados finais de Clark, para as estações hidrométricas de Quinta da Camilas Laveiras, Ponte Pinhal, Estação Agronómica Nacional e Senhora da Rocha (continuação).

4.2.6. Obtenção do hidrograma unitário sintético adimensional padronizado únicos

A partir dos hidrogramas unitários observados finais para as cinco bacias hidrográficas, obtidos pela resolução da equação da convolução discreta através do método dos mínimos quadrados, com duas restrições, considerando as perdas SCS e os acontecimentos sobrepostos (Fig. 4.22), determinaram-se os hidrogramas unitários sintéticos adimensionalizados padronizados através do tempo para a ponta e do caudal de ponta do hidrograma unitário (Fig. 4.25), associados a cada bacia hidrográfica. Conforme descrito na alínea 4.1.3.6., estes são transformados num hidrograma unitário único, mediante a média das ordenadas.

Na Fig. 4.25 apresentam-se os hidrogramas unitários sintéticos adimensionais padronizados das várias bacias hidrográficas, os hidrogramas unitários sintéticos adimensionais padronizados e equivalente triangular únicos obtidos a partir daqueles, e os hidrogramas triangular e curvilíneo resultantes da aplicação do método original do SCS (1972).

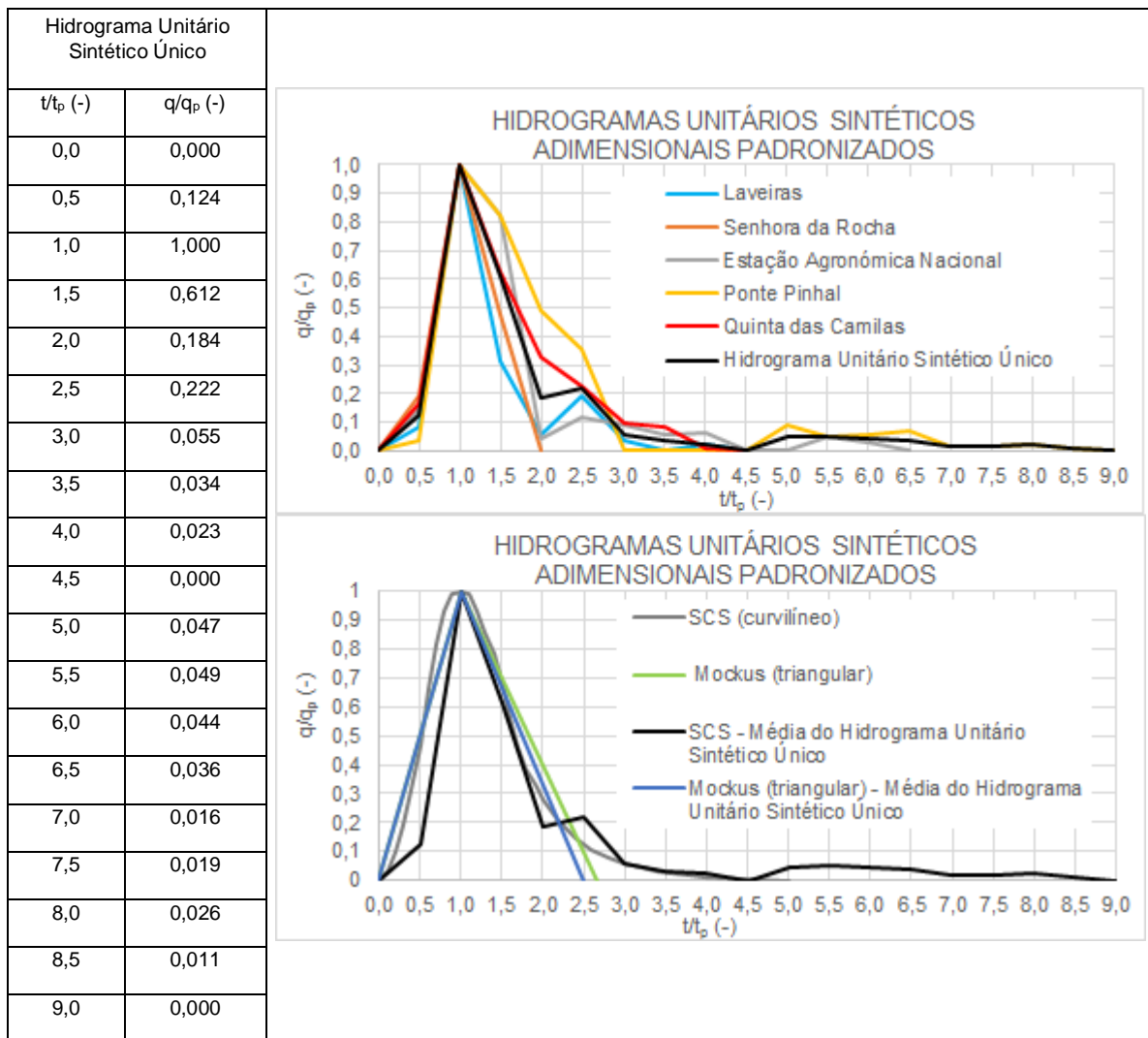


Figura 4.25 – Hidrogramas unitário sintéticos adimensionais padronizados.

A análise da figura anterior permite constatar algumas diferenças, nomeadamente, os tempos de base do hidrograma unitário curvilíneo e triangular do SCS (1972) são, respetivamente, mais longo e mais curto do que os dos hidrogramas unitários únicos aqui obtidos. As diferenças nestes hidrogramas unitários sintéticos podem ser quantificadas a partir da comparação entre as equações apresentadas na alínea 4.1.3.4. e as indicadas para o tempo para a ponta (t_p), o tempo de base (t_b), o caudal de ponta do hidrograma unitário (q_p) e o tempo de concentração (t_c) resultantes de uma precipitação unitária, expressas por:

$$t_p = 0,383t_c \quad (4.65)$$

$$t_b = 2,5t_p \quad (4.66)$$

$$q_p = \frac{0,248A}{t_p} \quad (4.67)$$

O tempo de base do hidrograma unitário triangular é aquele que assegura um hidrograma unitário triangular equivalente ao hidrograma unitário adimensional padronizado único. Os caudais de ponta dos dois hidrogramas unitários sintéticos únicos são iguais tendo-se utilizado a função solver para determinar a constante da Eq. (4.66) de forma a obter áreas iguais nos dois hidrogramas unitários.

As características hidrológicas do hidrograma unitário sintético único obtido são substancialmente diferentes dos propostos pelo método do SCS (1972), havendo uma redução nas constantes que permitem obter o tempo de base e o tempo para a ponta a partir, respetivamente, do tempo para a ponta e do tempo de concentração. Simultaneamente, a determinação de caudal de ponta unitário implica um aumento da constante proposta pelo SCS (1972), que relaciona a o caudal e o quociente entre a área da bacia hidrográfica e o tempo para a ponta.

O tempo de concentração e de atraso observados finais resultam da média dos tempos de concentração (t_c) e de atraso (t_t) dos acontecimentos hidrometeorológicos analisados em cada bacia hidrográfica, considerando as perdas SCS. Os tempos de concentração observados nas cinco bacias hidrográficas correspondem ao tempo que decorre entre o final da precipitação e o final do hidrograma do escoamento direto (alínea 4.1.3.2.). Na aplicação do método do SCS (curvilíneo e triangular) considerou-se a formulação original, logo, o tempo de concentração definido pelo SCS (1972), utilizando as Eqs. (4.17) e (4.20) (alínea 4.1.3.4.).

Na Fig. 4.26 apresenta-se a relação entre os valores médios dos tempos de concentração (alínea 4.1.3.2.) e dos tempos de atraso, resultantes da análise dos acontecimentos hidrometeorológicos observados em cada uma das cinco bacias hidrográficas, e as expressões matemáticas que as descrevem, assim como as relações correspondentes do método original SCS (1972, 1973) e USDA (2007).

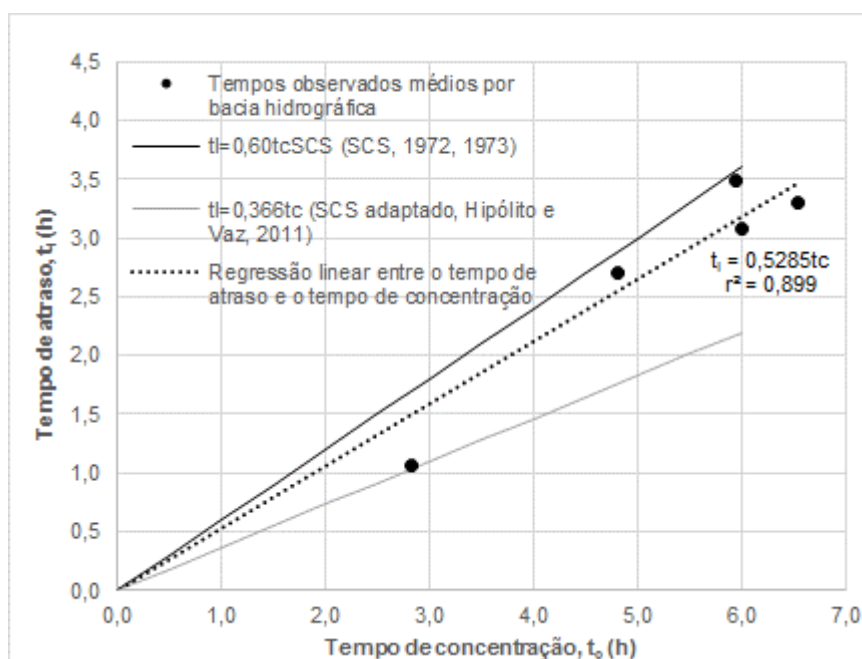


Figura 4.26 – Comparação dos tempos de concentração e de atraso.

A partir da análise da Fig. 4.26 é possível constatar que a expressão matemática da relação entre os tempos de concentração médios e os tempos de atraso médios observados para cada bacia hidrográfica é próxima da relação do método SCS (Eq. (4.20)). Os tempos de concentração utilizados são quantificados de forma diferente: os observados correspondem ao “tempo que medeia entre o fim da precipitação útil e o fim do escoamento direto na secção de referência” (alínea 4.1.3.2.) e no de SCS corresponde à duração entre o final da precipitação útil até ao ponto de inflexão do hidrograma unitário curvilíneo (alínea 4.1.3.4.). Assim, a diferença obtida de

cerca de 0,0715 poderá resultar dos distintos conceitos do tempo de concentração e da fração deste tempo associado ao tempo de atraso.

Comparando a relação obtida entre os tempos observados de t_i e de t_c com a relação entre o tempo de atraso e o tempo concentração definida pela Eq. (4.24) (Hipólito e Vaz, 2011), verifica-se que a obtida pelos tempos observados corresponde a uma diferença superior a 16 % em relação à proposta por Hipólito e Vaz (2011). Logo, a relação proposta por Hipólito e Vaz (2011) estará mais afastada da realidade analisada, do que a proposta pelo SCS (1972, 1973).

4.2.7. Obtenção do hidrogramas unitários específicos para cada bacia hidrográfica

Aos hidrogramas unitários adimensionais, padronizados pelo tempo para a ponta e pelo caudal de ponta do hidrograma unitário, foram ajustadas as funções de densidade de probabilidade Gama (Eq. (4.53)), através da obtenção do melhor valor do fator de forma desta função (K_g) e assegurando o princípio da conservação da massa, Eq. (4.55), conforme exposto na alínea 4.1.3.7. (Quadro 4.16). Desta forma, obtiveram-se os hidrogramas unitários sintéticos curvilíneos, segundo o USDA (2007) (Fig. 4.27), que se designaram por hidrogramas unitários específicos.

Quadro 4.16 – Fator de forma da função densidade de probabilidade Gama (K_g), associada às bacias definidas em Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.

Estação hidrométrica do SNIRH	Fator de forma da função densidade de probabilidade Gama (K_g)
Quinta das Camilas	4,116
Estação Agronómica Nacional	4,468
Laveiras	8,844
Senhora da Rocha	9,182
Ponte Zambujal	Não foi possível determinar
Ponte Pinhal	2,870
Colares	Não foi possível determinar

Os valores do fator de forma obtidos que permitiram a determinação de cinco hidrogramas unitários específicos para cada bacia hidrográfica variam entre 2,870 a 9,182.

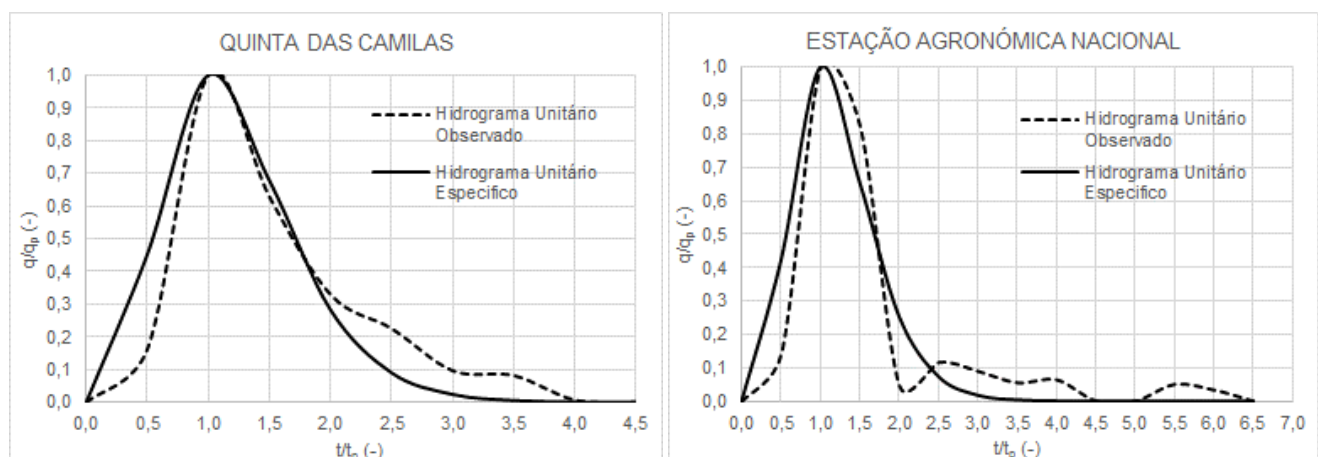


Figura 4.27 Hidrogramas unitários observados ajustados à função Gama e que suportam à determinação dos hidrogramas unitários específicos (continua).

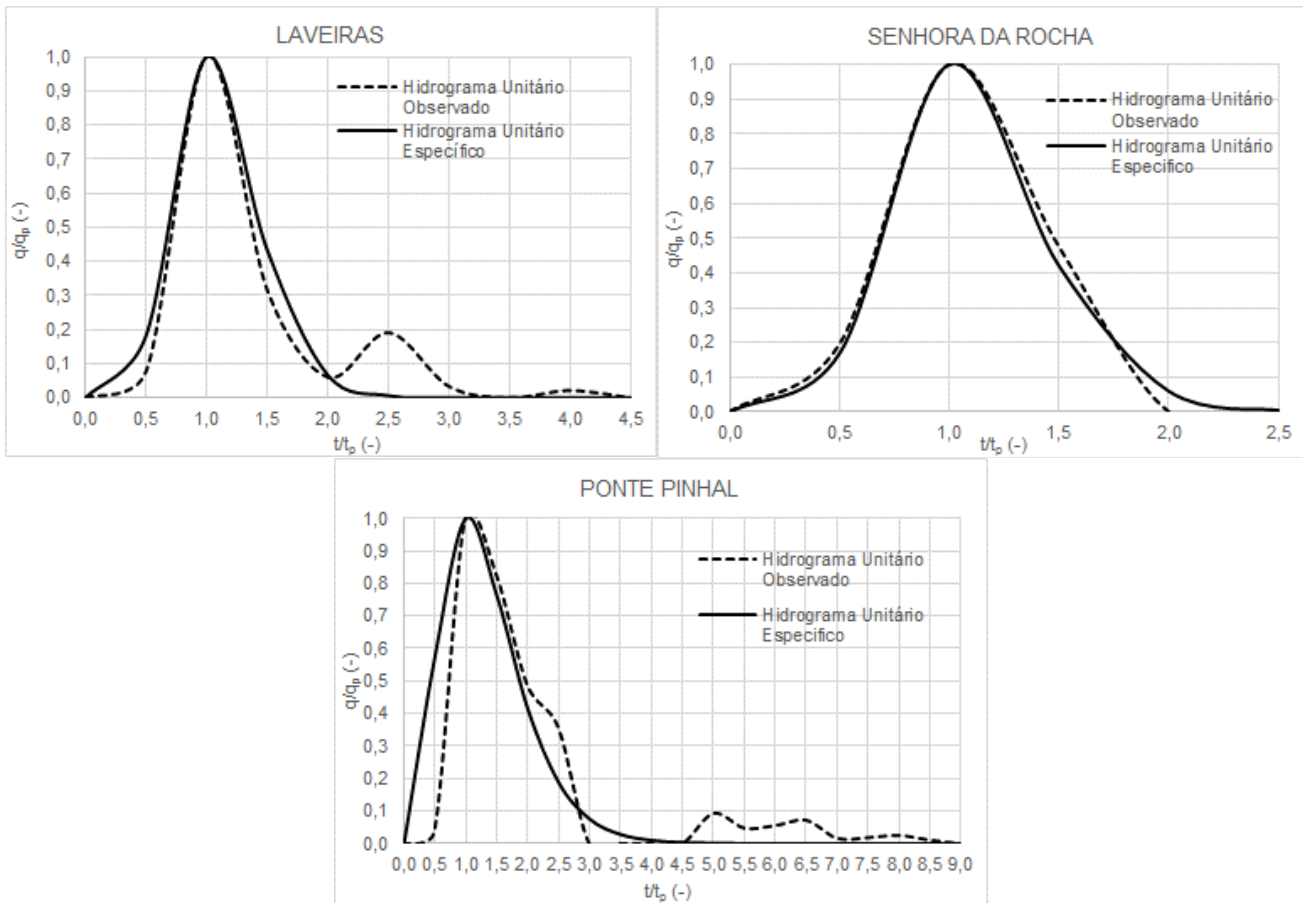


Figura 4.27 Hidrogramas unitários observados ajustados à função Gama e que suportam à determinação dos hidrogramas unitários específicos (continuação).

Considerando estes hidrogramas unitários adimensionais padronizados, procedeu-se ao processo inverso, isto é, à sua conversão em hidrograma unitário específico, através do produto das abcissas e das ordenadas adimensionais padronizadas pelos tempos para a ponta e pelo caudal de ponta do hidrograma unitário observado em cada bacia hidrográfica, respetivamente (Fig. 4.28).

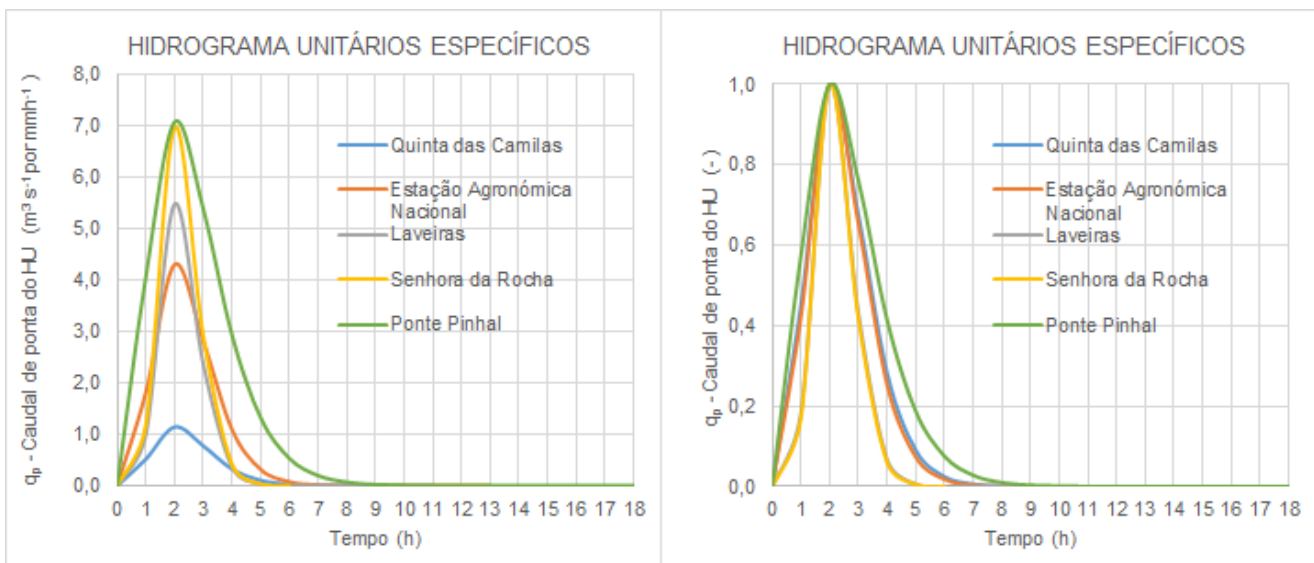


Figura 4.28 – Hidrogramas unitários específicos para cada bacia hidrográfica.

4.2.8. Obtenção de um hidrograma unitário sintético curvilíneo para a região

Com o objetivo de determinar um hidrograma unitário sintético aplicável à região, procedeu-se à avaliação das relações entre as características fisiográficas e as características hidrológicas necessárias à sua definição, como indicada na alínea 4.1.3.8..

No Quadro 2.1 (capítulo 2) indicam-se os valores de quatro das características fisiográficas (área da bacia hidrográfica, o comprimento do curso de água, o declive médio da bacia hidrográfica, o declive do curso de água principal), às quais se acrescentaram a percentagem de área urbana e o comprimento médio do escoamento superficial, apresentados no Quadro 4.17.

Quadro 4.17 – Características fisiográficas associadas às bacias definidas em Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Zambujal e Ponte Pinhal e Colares.

Estação hidrométrica do SNIRH	A - Área da bacia (km ²)	L_s - Comprimento médio do escoamento superficial (m)	A_u - Área urbana (%)	L_{ca} - Comprimento do curso de água principal (km)	Y - Declive médio da bacia hidrográfica (%)	J - Declive do curso de água (-)
Quinta das Camilas	10,406	666,7	45,2	7,022	7,962	0,037
Estação Agronómica Nacional	37,542	541,4	58,7	15,629	7,113	0,013
Laveiras	33,203	537,6	48,7	18,083	9,283	0,016
Senhora da Rocha	41,357	488,7	43,1	14,236	10,036	0,020
Ponte Zambujal	103,718	530,0	12,7	20,395	12,590	0,008
Ponte Pinhal	77,626	555,6	14,8	17,512	14,165	0,021
Colares	32,282	680,0	22,2	11,536	13,472	0,022
Parâmetros estatísticos						
Média	40,027	558,0	42,1	14,496	9,712	0,0211
Variância	586,400	4330,6	269,0	19,794	7,484	0,0001

As características hidrológicas consideradas foram o fator de forma da função densidade de probabilidade Gama (K_g), o tempo de base (t_b), o caudal de ponta do hidrograma unitário (q_p) e a razão entre o tempo para a ponta e o tempo de base (t_p/t_b), que se apresentam no Quadro 4.18. O tempo para a ponta (t_p) não foi considerado, uma vez que os valores observados são todos iguais a dois, o que impossibilita o seu relacionamento com a diversidade das características fisiográficas.

Quadro 4.18 – Características hidrológicas associadas às bacias definidas em Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Zambujal e Ponte Pinhal e Colares.

Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Zambujal e Ponte Pinhal e Colares.				
Estação hidrométrica do SNIRH	K_g - Fator de forma da função densidade de probabilidade Gama (-) (Quadro 4. 16)	t_b – tempo de base (h)	q_p – Caudal de ponta do hidrograma unitário (m³ s ⁻¹ por mm h ⁻¹)	t_p/t_b - relação tempo para a ponta e o tempo de base (-)
Quinta das Camilas	4,116	9	1,146	0,222
Estação Agronómica Nacional	4,468	13	4,316	0,154
Laveiras	8,844	9	5,420	0,222
Senhora da Rocha	9,182	4	6,881	0,500
Ponte Zambujal	Não foi possível determinar			
Ponte Pinhal	2,870	18	7,079	0,111
Colares	Não foi possível determinar			
Parâmetros estatísticos				
Média	5,896	10,6	4,968	0,242
Variância	8,464	27,3	5,838	0,023

Em primeiro lugar, o grau da relação linear entre os dois conjuntos de variáveis indicado foi analisado através do coeficiente de correlação entre estas, r (Quadro 4.19). Verifica-se que os coeficientes de correlação entre as características hidrológicas e fisiográficas mais elevados (r) (superiores a 0,60) correspondem às relações entre:

- O tempo de base (t_b) e a área da bacia (A).
- O caudal de ponta (q_p) e a área da bacia (A), o comprimento médio do escoamento superficial (L_s), o comprimento do curso de água principal (L_{ca}), o declive médio da bacia hidrográfica (Y) ou o declive do curso de água (J).

Os coeficientes de sinal negativo significam que a dependência entre as variáveis é inversamente proporcional. Dos resultados obtidos, verifica-se que o caudal de ponta do hidrograma unitário (q_p) poderá ser determinado recorrendo a diversas características fisiográficas, sendo as melhores correlações (superior a 0,8) as obtidas com a área da bacia hidrográfica (A), com o comprimento médio do escoamento superficial (L_s) e comprimento do curso de água principal (L_{ca}). A característica fisiográfica que melhor correlação linear apresenta com o fator de forma (K_g) é o comprimento médio do escoamento superficial (L_s).

Quadro 4.19 – Valores dos coeficientes de correlação, r .

Coeficiente de correlação (r)	K_g (-)	t_b (h)	q_p ($m^3 s^{-1}$)	t_p/t_b (-)	A (km^2)	L_s (m)	A_u (%)	L_{ca} (km)	Y (%)	J (-)
K_g - Fator de forma	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
t_b - Tempo de base (h)	-0,812	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-
q_p - Caudal de ponta do hidrograma unitário ($m^3 s^{-1}$)	0,319	0,135	1,000	-	-	-	-	-	-	-
t_p/t_b (-)	0,762	-0,888	0,233	1,000	-	-	-	-	-	-
A - Área da bacia (km^2)	-0,260	0,636	0,827	-0,247	1,000	-	-	-	-	-
L_s - Comprimento médio do escoamento superficial (m)	-0,588	0,188	-0,867	-0,447	-0,505	1,000	-	-	-	-
A_u - Área urbana (%)	0,401	-0,539	-0,475	0,220	-0,758	-0,019	1,000	-	-	-
L_{ca} - Comprimento do curso de água principal (km)	0,237	0,355	0,821	-0,179	0,713	-0,763	-0,216	1,000	-	-
Y - Declive médio da bacia hidrográfica (%)	-0,215	0,491	0,689	-0,137	0,865	-0,238	-0,962	0,451	1,000	-
J - Declive do curso de água (-)	-0,321	-0,162	-0,671	0,047	-0,473	0,834	-0,187	-0,888	-0,058	1,000

A avaliação da significância da regressão das seis características fisiográficas visando a determinação das quatro características hidrológicas foi efetuada através da aplicação do teste F (Quadro 4.20), considerando como base um nível de confiança ($1-\alpha_1$) de 0,95.

Existe significância para a regressão linear, entre as variáveis avaliadas, quando o valor do teste F é maior que o valor do $F_{crítico}$. Em alternativa, a significância poderá ser avaliada através do valor da probabilidade associado ao valor do teste F : quando este é menor que do que o nível de significância (α_1), rejeita-se a hipótese nula, isto, é rejeita-se H_0 (há correlação entre variáveis). Neste contexto, verifica-se que para determinar K_g , q_p e t_b não terão significância os contributos de L_{ca} e Y . Portanto, numa primeira fase poderão ser excluídas estas características para estimar K_g , q_p ou t_b . Para a relação t_p/t_b não existem variáveis fisiográficas excluídas.

Os coeficientes de correlação e os resultados do teste F foram determinados recorrendo à opção “análise de dados>Teste F: duas amostras para variâncias” disponível no programa Excel. Contudo, há que analisar o seu

contributo em conjunto com as outras características fisiográficas, visando selecionar a melhor combinação. Para tal, recorreu-se ao método backward elimination.

Quadro 4.20 – Resultados da aplicação do teste *F* (Eq. (4.59b)), com o recurso ao programa de Excel opção Teste *F*: duas amostras para variâncias, para uma significância de 0,05, para o fator de forma da função densidade de probabilidade Gama (K_g), o tempo de base do hidrograma unitário (t_b), caudal de ponta do hidrograma unitário (q_p) e a relação t_p/t_b , considerando individualmente cada uma das seis características fisiográficas. O número de observações (N_x) e o graus de liberdade (g), das séries das características fisiográficas e hidrológicas, é igual a 5 e 4 respetivamente.

Parâmetros estatísticos das características fisiográficas (x_i) considerando y_i	A - Área da bacia (km^2)	A_u - Área urbana (%)	Y - Declive médio da bacia hidrográfica (%)	L_s - Comprimento médio do escoamento superficial (m)	L_{ca} - Comprimento do curso de água principal (km)	J - Declive do curso de água (-)
Característica hidrológica (y_i)	K_g - Fator de forma (-)					
Observações (N_x)	5	5	5	5	5	5
$g = N_x - 1$	4	4	4	4	4	4
Teste F	69,283	31,783	1,131	511,659	2,339	99503,977
Probabilidade unilateral	0,001	0,003	0,454	0,000	0,215	0,000
Fcrítico (g_{ln} , g_{ld}) unilateral	6,388	6,388	6,388	6,388	6,388	6,388
Conclusão	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Não Significativo: Teste $F < F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Não Significativo: Teste $F < F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$
Característica hidrológica (y_i)	t_g - Tempo de base (h)					
Observações (N_x)	5	5	5	5	5	5
$g = N_x - 1$	4	4	4	4	4	4
Teste F	21,480	9,854	3,648	158,630	1,379	320949,918
Probabilidade unilateral	0,006	0,024	0,119	0,000	0,381	0,000
Fcrítico (g_{ln} , g_{ld}) unilateral	6,388	6,388	6,388	6,388	6,388	6,388
Conclusão	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Não Significativo: Teste $F < F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Não Significativo: Teste $F < F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$
Característica hidrológica (y_i)	q_p - Caudal de ponta do hidrograma unitário ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)					
Observações (N_x)	5	5	5	5	5	5
$g = N_x - 1$	4	4	4	4	4	4
Teste F	100,454	46,082	1,282	741,855	3,391	68628,143
Probabilidade unilateral	0,000	0,001	0,408	0,000	0,132	0,000
Fcrítico (g_{ln} , g_{ld}) unilateral	6,388	6,388	6,388	6,388	6,388	6,388
Conclusão	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Não Significativo: Teste $F < F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Não Significativo: Teste $F < F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$
Característica hidrológica (y_i)	t_p/t_b (-)					
Observações (N_x)	5	5	5	5	5	5
$g = N_x - 1$	4	4	4	4	4	4
Teste F	25426,760	11664,123	324,519	187777,609	858,303	271,130
Probabilidade unilateral	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fcrítico (g_{ln} , g_{ld}) unilateral	6,388	6,388	6,388	6,388	6,388	6,388
Conclusão	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$	Significativo: Teste $F > F_{crítico}$

As séries das variáveis em avaliação são compostas por um número reduzido de cinco valores e seis parâmetros a avaliar, associados às seis características hidrológicas, o que impede que se implemente num único processo o método *backward elimination* considerando todas as variáveis independentes, pois são obtidos graus de

liberdades residual negativos incompatíveis com a determinação do teste *F*. Neste contexto, foi necessário fragmentar o processo do método *backward elimination* visando considerar todas as combinações (C_o) possíveis das seis características fisiográficas (n) agrupadas em conjuntos de quatro (p) contabilizadas pela Eq. (4.68).

$$C_o(n, p) = C_o(6, 4) = \frac{n!}{(p!(n-p)!)} \quad (4.68)$$

Como resultado da equação anterior são obtidas quinze combinações possíveis, que serão testadas e que estão indicadas no Quadro 4.21.

Quadro 4.21 – Combinações testadas visando obter as que melhor estimam as características hidrológicas.

Características fisiográficas (n)	Combinações - $C_o(n, p) = C_o(6, 4) = 15$														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A - Área (km ²)	A	A	A				A		A	A	A	A		A	A
L _s - Comprimento médio do escoamento superficial (m)	L _s			L _s	L _s		L _s	L _s	L _s	L _s	L _s		L _s	L _s	
A _u - Área urbana (%)	A _u	A _u		A _u		A _u		A _u	A _u	A _u		A _u	A _u		A _u
L _{ca} - Comprimento do curso de água principal (km)	L _{ca}	L _{ca}	L _{ca}	L _{ca}	L _{ca}	L _{ca}	L _{ca}	L _{ca}						L _{ca}	L _{ca}
Y - Declive médio da bacia hidrográfica (%)		Y	Y	Y	Y	Y	Y			Y	Y	Y	Y		
J - Declive do curso de água (-)			J		J	J		J	J		J	J	J	J	J

A aplicação do método *backward elimination* para as quinze combinações indicadas no Quadro 4.21, implementado no programa Excel, permitiu obter as equações cujos coeficientes associados às variáveis independentes se apresentam no Quadro 4.22, tendo sido considerado unitário o coeficiente c_o da Eq. (4.57). A aplicação destas equações permite definir um hidrograma unitário sintético aplicável à região, uma vez que é possível determinar a forma do hidrograma unitário e o seu caudal de ponta. No **Anexo 18** apresentam-se os resultados obtidos pelo método *backward elimination* através do processo fragmentado e que estão na base da seleção apresentada no Quadro 4.21. Face aos resultados, verifica-se que as variáveis L_{ca} não tem contributo significativo para determinar as variáveis hidrológicas q_p , K_g e t_b , indo ao encontro de uma das conclusões resultantes da aplicação do teste *F* entre duas variáveis (uma hidrológica e uma fisiográfica).

Quadro 4.22 – Coeficientes c_i da Eq. (4.57) que relacionam as características hidrológicas (variáveis dependentes) e as características fisiográficas (variáveis independentes). Resultado do método *backward elimination* (α_1 igual a 0,05).

Variáveis dependentes, y_i da Eq. (4.57) (características hidrológicas)	Coeficientes da Eq. (4.57) c_i associadas às variáveis independentes x_i (características fisiográficas)						r^2 e r^2 ajustado
	A - Área da bacia (km ²)	A _u - Área urbana (%)	Y - Declive médio da bacia hidrográfica (%)	L _s - Comprimento médio do escoamento superficial (m)	L _{ca} - Comprimento do curso de água principal (km)	J - Declive do curso de água (-)	
K_g	-	0,461	-	-	-	-	0,955 e 0,705
q_p	-	-	1,711	-1,161	-	-1,256	0,944 e 0,487
t_b	-	-	-	0,356	-	-	0,955 e 0,705
t_p/t_b	-	-	-	-0,246	-	-	0,909 e 0,659

As regressões indicadas no Quadro 4.22 estão associadas a coeficientes de determinação (r^2) superior a 0,90, sendo estes valores influenciados pelos valores de Senhora da Rocha, situação que também ocorre quando se comparam os tempos de concentração e tempos de atraso (Fig. 4.26). É de realçar que em quase todas as estimativas a variável L_s é sempre selecionada. O tempo para a ponta nas bacias analisadas é igual a 2 horas, pelo que é este o valor considerado na determinação do hidrograma unitário sintético das bacias analisadas.

Os caudais de ponta e a forma dos hidrogramas unitários sintéticos e específicos nas cinco bacias são muito semelhantes aos dos hidrogramas observados, exceto na estação de Senhora da Rocha (Fig. 4.29). Os hidrogramas unitários sintéticos aplicáveis à região, comparados com os hidrogramas unitários observados e específicos, têm caudais e durações de base obtidas por aplicação das equações indicadas no Quadro 4.22 e tempo para a ponta de 2 horas. Para as estações hidrométricas de Colares e Ponte Zambujal apenas foram determinados os hidrogramas unitários sintéticos aplicáveis à região (Fig. 4.29).

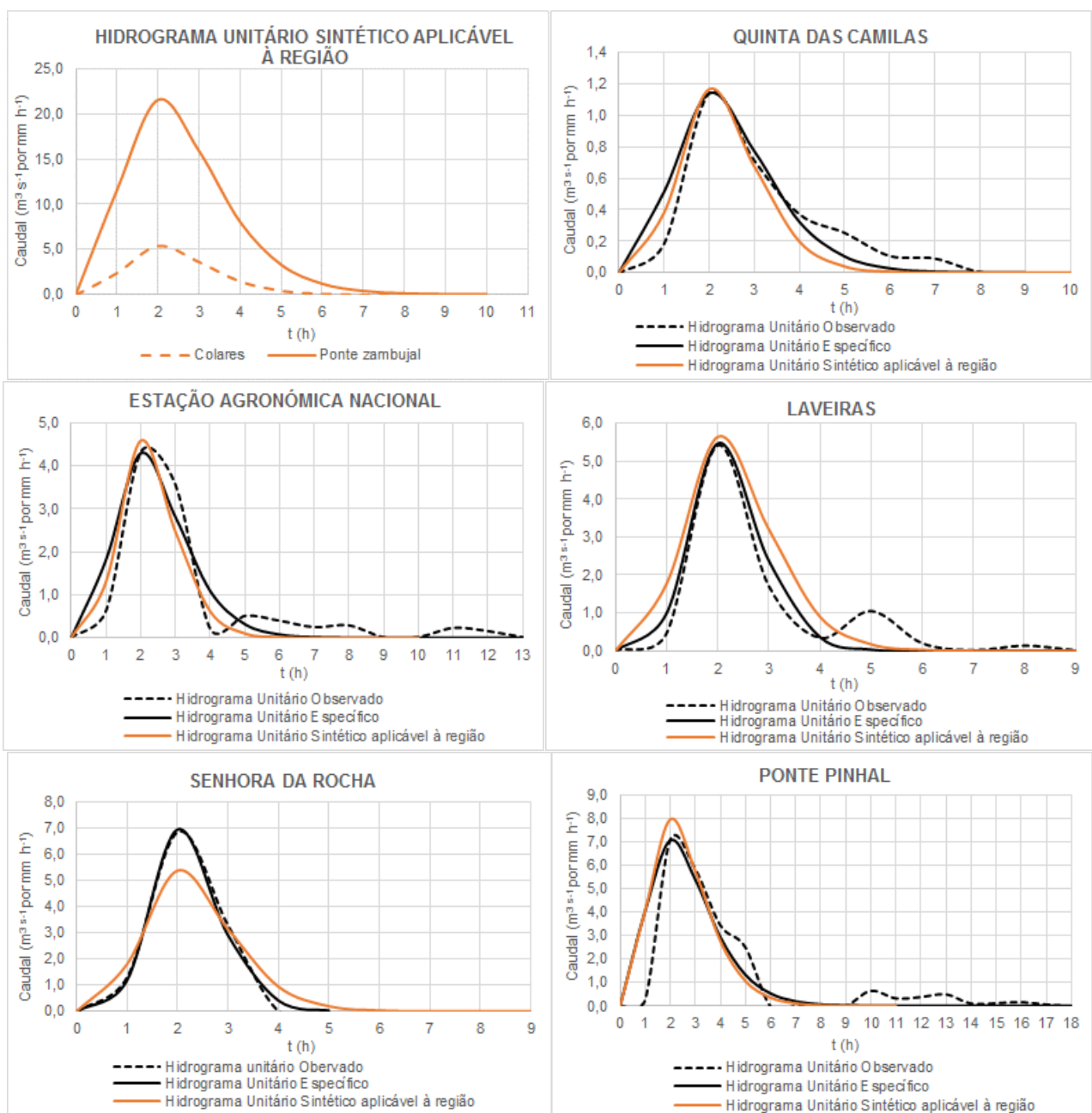


Figura 4.29 – Comparação dos hidrogramas unitários específico e sintéticos aplicáveis à região.

No Quadro 4.23 apresentam-se os resultados obtidos pela aplicação do método *stepwise regression* recorrendo ao *software Real Statistics*, considerando α_1 igual a 0,05. Nas situações onde não foi possível obter resultados efetuou-se, também, a aplicação do método com α_1 igual a 0,15, valor normalmente utilizado no *stepwise regression*, segundo Charles Zaiantz (2013 – 2017). Contudo, não houve alteração de resultados, não tendo sido obtidos modelos para determinar as características hidrológicas K_g , t_b e t_p/t_b e, por isso, definir os hidrogramas unitários sintéticos.

Quadro 4.23 – Coeficientes c_i da Eq. (4.57) que relacionam as características hidrológicas (variáveis dependentes) e as características fisiográficas (variáveis independentes). Resultado do método *stepwise regression* (α_1 igual a 0,05).

Variáveis dependentes, y_i da Eq. (4.57) (características hidrológicas)	Coeficientes da Eq. (4.57) c_i associadas às variáveis independentes x_i (características fisiográficas)						c_0	r^2 e r^2 ajustado
	A - Área da bacia (km^2)	A_u - Área urbana (%)	Y - Declive médio da bacia hidrográfica (%)	L_s - Comprimento médio do escoamento superficial (m)	L_{ca} - Comprimento do curso de água principal (km)	J - Declive do curso de água (-)		
K_g	Não foi possível obter resultados							
q_p	0,968	-	-	-	-	-	-0,851	0,880 e 0,839
t_b	Não foi possível obter resultados							
t_p/t_b	Não foi possível obter resultados							

Em ambos os métodos de seleção de variáveis optou-se, também, por avaliar o coeficiente de determinação ajustado (r^2 ajustado) visando selecionar o modelo com variáveis significativas com poder explicativo.

4.2.9. Comparação entre hidrogramas unitários sintéticos adimensionais

Os hidrogramas unitários sintéticos triangulares adimensionais, obtidos pela aplicação das metodologias de Mockus (SCS triangular) e de Temez associadas às sete bacias hidrográficas, estão representados na Fig. 4.30 e os valores dos parâmetros caudal de ponta, tempo de base e tempo para a ponta estão indicados no **Anexo 13**. Na mesma figura apresenta-se o hidrograma unitário sintético resultante da média dos hidrogramas unitários sintéticos adimensionais das sete bacias hidrográficas, definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Zambujal, Ponte Pinhal e Colares.

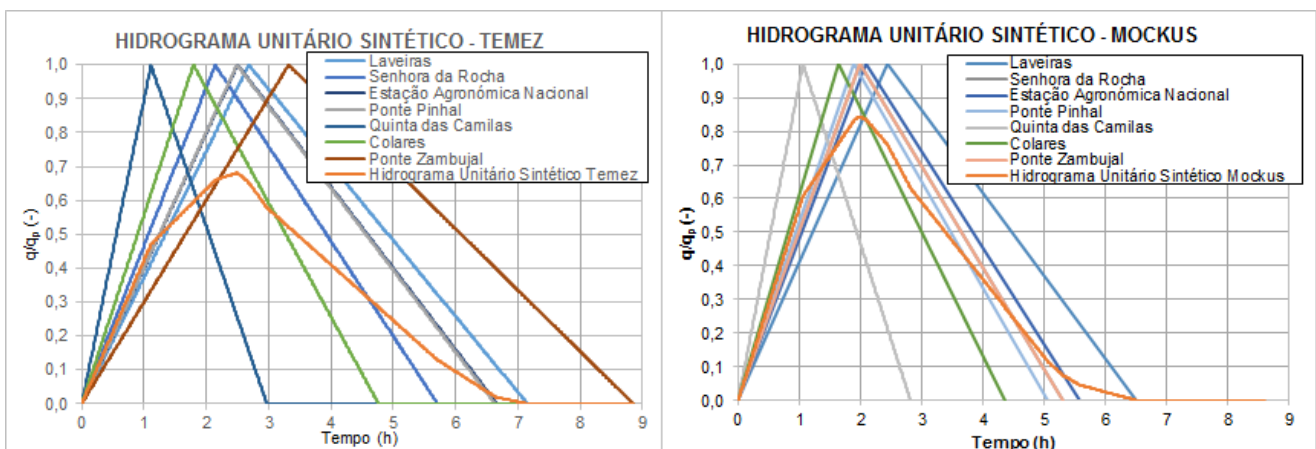


Figura 4.30 - Hidrogramas unitários sintéticos segundo Temez e Mockus, para as bacias hidrográficas em análise.

Na Fig. 4.31 comparam-se os hidrogramas unitários sintéticos resultantes da aplicação de cinco métodos: SCS curvilíneo e Mockus (SCS triangular), Temez, duas versões do SCS único e o sintético aplicável à região.

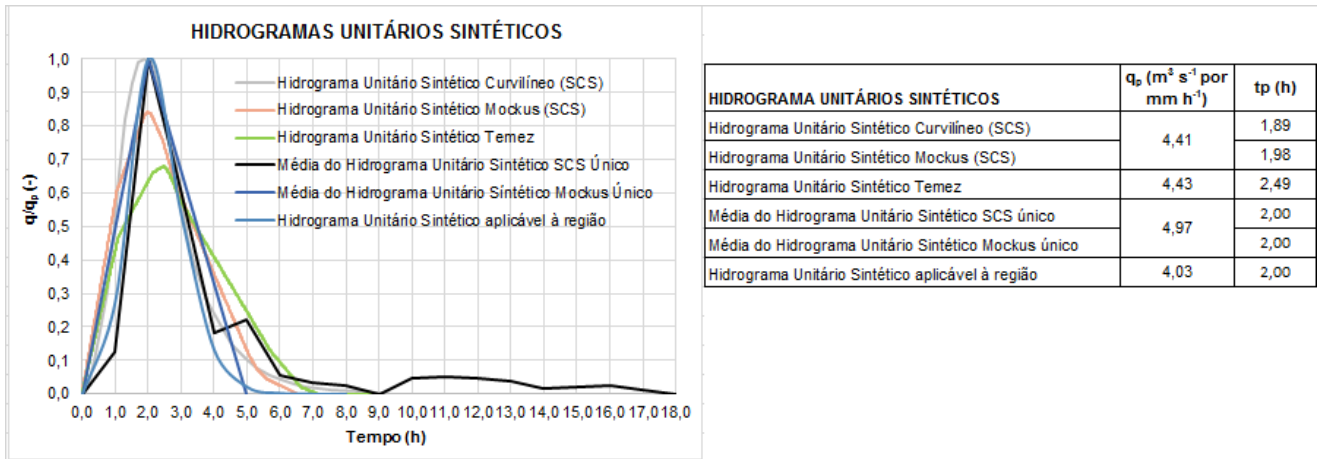


Figura 4.31 – Comparação dos hidrogramas unitários sintéticos.

A Fig. 4.31 indica que os caudais de ponta de cheia dos hidrogramas unitários únicos, obtidos pelas médias dos hidrogramas observados, são superiores aos obtidos pelo método original SCS (curvilíneo e Mockus) e Temez, sendo o menor valor associado ao hidrograma unitário sintético aplicável à região. Os hidrogramas unitários sintéticos curvilíneo e de Mockus têm tempos para a ponta semelhantes e mais curtos do que o hidrograma unitário sintético de Temez, tendo os hidrogramas unitários únicos e aplicáveis à região tempos para a ponta intermédios. O hidrograma unitário sintético aplicável à região foi estimado considerando a informação das cinco bacias hidrográficas definidas nas estações hidrográficas.

4.2.10. Conclusões

Em geral, os coeficientes de variação das características hidrológicas de escoamento total e direto são inferiores à unidade (Quadros 4.9 e 4.10). No que concerne às características hidrológicas como a retenção potencial máxima de água no solo e as perdas estimadas a partir do índice Φ , na maioria das situações, o coeficiente de variação é superior à unidade. Em relação aos hidrogramas de escoamento total e às cinco bacias hidrográficas, em média, os caudais de ponta (Q_p) variam entre $9,39 m^3 s^{-1}$ (na menor bacia hidrográfica analisada) e $31,39 m^3 s^{-1}$ (na maior bacia hidrográfica analisada), os caudais de base (Q_{b0}) estão entre $0,01$ e $2,2 m^3 s^{-1}$ e os caudais de início de recessão estão entre $0,01$ e $3,55 m^3 s^{-1}$. Em média, nos hidrogramas de escoamento direto das bacias analisadas, os tempos para a ponta (T_p) são aproximadamente 7 h. Os tempos de atraso (t_l) variam entre 1,06 e 3,48 h, enquanto os tempos de concentração (t_c) estão compreendidos entre 2,83 e 6,53 h, com o hietograma de precipitação útil obtido considerando o método de perdas do SCS.

A maior constante de exaurimento (α) média verificou-se na bacia definida na estação de Senhora da Rocha ($0,52 h^{-1}$), rio Jamor, enquanto a menor verificou-se na bacia definida na Quinta das Camilas ($0,04 h^{-1}$), ribeira de Caparide, valor este muito próximo das restantes bacias analisadas. Os coeficientes de escoamento médios variam entre 0,18 (Senhora da Rocha) e 0,53 (Laveiras).

As bacias hidrográficas apresentam Números de Escoamento calibrados (N) médios compreendidos entre 72,23 (Senhora da Rocha) e 91,64 (Laveiras), com desvios-padrão de 7,74 (Laveiras) a 18,98 (Senhora da Rocha), o que corresponde a grandes diferenças entre as capacidades de armazenamento das bacias hidrográficas (S)

analisadas. Com exceção da bacia hidrográfica definida em Ponte Pinhal e Senhora da Rocha, os Números de Escoamento calibrados médios são superiores aos valores pré-definidos associados a AMC_{II} , sendo o valor médio do Número de Escoamento calibrado em Ponte Pinhal muito próximo do Número de Escoamento inicial (AMC_{II}). As bacias definidas pelas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional e Laveiras, apresentam Números de Escoamento calibrados próximos de 90, sendo Laveiras a única situação em que o valor médio calibrado é superior ao pré-definido para AMC_{III} .

Decorrente da avaliação do hidrograma de escoamento total e direto, verificou-se que em média o escoamento de base representa 29 %, com desvio-padrão de 20 %, do escoamento total.

As perdas iniciais obtidas pela análise dos 68 acontecimentos hidrometeorológicos correspondem a 3 % da retenção potencial máxima de água do solo da bacia hidrográfica, logo menor que os 20 % preconizados pela metodologia do SCS (1972 e 1973). Contudo, o valor determinado é próximo dos 5 % proposto por Mishra e Singh (2003) e (Hawkins, *et al.*, 2006) e vai ao encontro das considerações de Correia (1984a e 1984b).

A partir dos hidrogramas do escoamento total obtiveram-se os hidrogramas de escoamento direto nas bacias hidrográficas monitorizadas, através de técnicas de separação dos componentes do hidrograma. A relação entre o hietograma de precipitação útil e o hidrograma do escoamento direto, que permitiu obter o hidrograma unitário de cada acontecimento hidrometeorológico, exigiu uma análise individual de cada acontecimento, dificultando a automatização deste processo.

Considerando os vários acontecimentos hidrometeorológicos, os hidrogramas unitários observados finais obtidos através da resolução da equação da convolução discreta recorrendo à minimização da soma dos quadrados dos erros da simulação dos caudais, com duas restrições, com o método de sobreposição dos acontecimentos hidrometeorológicos, independentemente do método de perdas considerado, antecipam o tempo para a ponta e têm tempos de base, geralmente, menores quando comparados com os hidrogramas unitários obtidos com o método gráfico. Os tempos característicos dos hidrogramas unitários observados finais (t_p e t_b) são geralmente menores quando o hidrograma unitário observado é determinado considerado o método de perdas SCS, comparativamente com os obtidos com o método do índice Φ . Os hidrogramas unitários observados finais têm durações de base maiores que os tempos de concentração médios observados nas bacias hidrográficas analisadas.

Os caudais de ponta dos hidrogramas unitários observados finais (u_p) variam entre 0,903 e 7,079 $m^3 s^{-1}$ por $mm h^{-1}$, (com método da sobreposição dos acontecimentos), sendo os maiores valores associados ao método de perdas SCS. Considerando o método de perdas SCS, os caudais adimensionais estão compreendidos entre 0,328 e 0,599 (com método sobreposição dos acontecimentos). Verifica-se que os maiores caudais de ponta dos hidrogramas unitários, recorrendo aos dois métodos de determinação de perdas, são obtidos nas estações de Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.

Verificou-se que a média do mínimo da Soma dos Quadrados das Diferenças (minSQD) entre os hidrogramas observados e os obtidos pela resolução da equação da convolução discreta, recorrendo à minimização da soma dos quadrados dos erros da simulação dos caudais com sobreposição dos acontecimentos, é menor quando é

selecionado o método de perdas SCS, exceto para a bacia em Senhora da Rocha, quando comparada com a obtida por aplicação do método do índice Φ .

Normalmente, independentemente dos quatro métodos de determinação dos diagramas tempo-área que suportam os hidrogramas unitários agregados finais de Clark (Kirpich, Huggins e Burney e duas versões do método de Liu, *et al.*, 2003), verifica-se que os coeficientes de armazenamento aumentam, os caudais de ponta dos hidrogramas unitários decrescem e os tempos para a ponta mantêm-se quando se comparam os métodos de perdas SCS e índice Φ .

Geralmente, os maiores coeficientes de armazenamento (K) e os menores caudais de ponta são observados na menor bacia hidrográfica analisada (estação da Quinta das Camilas), e os menores coeficientes de armazenamento e maiores caudais de ponta nas estações de Senhora da Rocha e Ponte Pinhal. Os maiores e menores tempos para a ponta são obtidos, respetivamente, na maior bacia hidrográfica analisada (estação de Ponte Pinhal) e na menor bacia hidrográfica (Quinta das Camilas). A aplicação dos quatro métodos conduziu a tempos de base entre 4 h (Senhora da Rocha) e 25 h (todas as bacias, exceto Laveiras cuja duração máxima é de 24 h), sendo que as maiores durações estão associadas ao método de perdas segundo o método do índice Φ e as mínimas ao método do SCS.

Na determinação dos hidrogramas unitários agregados finais de Clark, os coeficientes de armazenamento obtidos variam entre 0,486 e 5,091 h (isócronas calculadas com o método hidrológico e considerando qualquer método de perdas) ou entre 1,214 e 4,827 h (isócronas calculadas com o método hidráulico e considerando qualquer método de perdas), sendo que o tempo para a ponta é, geralmente, menor nos processos hidráulicos, nomeadamente considerando as perdas SCS. Considerando qualquer método de perdas, os caudais de ponta dos hidrogramas unitários agregados finais de Clark estão compreendidos entre 0,530 e 5,863 m³ s⁻¹ por mm h⁻¹ (métodos hidrológicos) ou entre 0,528 e 5,698 m³ s⁻¹ por mm h⁻¹ (métodos hidráulicos).

A simulação dos acontecimentos hidrometeorológicos através dos hidrogramas unitários agregados finais de Clark, implica a seleção de um dos hidrogramas unitários entre os obtidos a partir das isócronas determinadas por aplicação dos métodos hidrológicos (Kirpich, Huggins e Burney) e hidráulicos (duas versões ao método de Liu, *et al.*, 2003). Neste contexto, foi escolhido o método Liu, *et al.* (2003), com raio hidráulico unitário na secção de referência da bacia hidrográfica, uma vez que este conduz a tempos de concentração (duração total do diagrama tempo-área) mais próximos dos observados, estes determinados a partir da análise dos hidrogramas de escoamento direto. Estes tempos de concentração são, na maioria dos casos, menores e, portanto, durações que caso sejam utilizadas as curvas IDF conduzirão a maiores intensidades de precipitação, para o mesmo período de retorno, logo a um maior caudal. Por outro lado, o método Liu, *et al.* (2003) escolhido para a determinação das isócronas foi desenvolvido considerando eventos de cheia associados a períodos de retorno de 2 anos, que é semelhante à excecionalidade do limiar das precipitações (média da série histórica da precipitação diária máxima anual) que permitiu selecionar os acontecimentos hidrometeorológicos analisados no presente estudo (capítulo 2).

Os valores de ponta adimensionais dos hidrogramas unitários agregados de Clark são maiores do que os obtidos nos hidrogramas unitários observados, em qualquer das bacias hidrográficas analisadas e

independentemente do método de perdas adotado. Os tempos para a ponta dos hidrogramas unitários observados são, geralmente, próximos dos hidrogramas unitários agregados de Clark obtidos pelos métodos hidrológicos.

As características hidrológicas do hidrograma unitário sintético único obtido são substancialmente diferentes das propostas pelo método do SCS (1972). Assim, verifica-se:

- Uma redução nas constantes que permitem obter o tempo de base e o tempo de atraso a partir, respetivamente, do tempo para a ponta e do tempo de concentração;
- Um aumento da constante que permite determinar o caudal de ponta unitário através da área e do tempo para a ponta. Isto significa um maior contributo do quociente entre a área da bacia hidrográfica e tempo para a ponta do que o proposto pelo SCS (1972).
- Uma redução do tempo de base do hidrograma unitário triangular único em relação ao proposto pelo SCS (1972).

O tempo de atraso observado apresenta uma relação linear com o tempo de concentração (Fig. 4.26), com um coeficiente de determinação (r^2) de 0,8992. A relação obtida, Eq. (4.69), é semelhante à do SCS Eq. (4.20), apesar dos conceitos do tempo concentração serem diferentes: a) O tempo que decorre entre o final da precipitação e o final do hidrograma direto (adotado neste estudo); b) O tempo que decorre entre o final da precipitação útil e o ponto de inflexão do hidrograma unitário (SCS, 1972, 1973; USDA (2007).

$$t_l = 0,5285t_c \quad (4.69)$$

A diferença de cerca de 0,0715 entre a Eq. (4.69) e a Eq. (4.20) poderá resultar dos distintos conceitos do tempo de concentração e da fração deste tempo associado ao tempo de atraso. Por outro lado, a relação proposta por Hipólito e Vaz (2011), expressa pela Eq. (4.24), está mais afastada da realidade analisada do que a proposta pelo SCS (1972, 1973) e, portanto, não será necessário recorrer à Eq. (4.19).

Verifica-se, igualmente, que o tempo de concentração determinado pelo método de Temez é, geralmente, o que mais se aproxima do tempo de concentração observado, considerando o método de perdas SCS.

O ajustamento dos hidrogramas unitários adimensionais padronizados à função densidade de probabilidade Gama, que exigiu a determinação de valores do fator de forma (K_g), permitiu determinar os hidrogramas unitários Específicos das cinco bacias hidrográficas. Os valores do fator de forma variam entre 2,870 a 9,182, sendo o menor associado à maior bacia hidrográfica (Ponte Pinhal).

O hidrograma unitário sintético aplicável à região (alternativo ao Temez ou ao SCS) foi obtido por regressão múltipla, com métodos de *backward elimination* ou de *stepwise regression*, que determina as características hidrológicas do hidrograma unitário sintético (q_p , K_g , t_b e t_p/t_b) através da seleção das características fisiográficas significativas. Este processo permitiu identificar o conjunto de coeficientes de regressão associados às características fisiográficas significativas, entre as seis avaliadas: área da bacia hidrográfica, área urbana, declive do curso de água principal da bacia hidrográfica, declive médio da bacia hidrográfica, comprimento do curso de água principal e comprimento médio do escoamento superficial.

Este processo permitiu definir as expressões matemáticas cujos parâmetros se encontram no Quadro 4.22, definindo regressões que estimam q_p , K_g , t_b e t_p/t_b e estão associadas a coeficientes de determinação (r^2) superiores a 0,90. Os hidrogramas unitários sintéticos aplicáveis à região, obtidos para cada uma das bacias hidrográficas, têm configurações muito semelhantes às dos hidrogramas unitários observados, exceto na bacia hidrográfica da Senhora da Rocha. Os resultados, sendo satisfatórios, decorrem de um número limitado de bacias hidrográficas e, por isso, a aplicação dos resultados obtidos em outras situações deverá ser avaliada criteriosamente.

Os caudais de ponta de cheia do hidrograma unitário únicos, obtidos pelas médias dos hidrogramas observados ($4,97 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por mm h^{-1}), são superiores aos obtidos pelo método original do SCS, curvilíneo e Mockus ($4,40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por mm h^{-1}), sendo o menor valor associado ao hidrograma unitário sintético aplicável à região ($4,03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por mm h^{-1}). Os hidrogramas unitários sintéticos curvilíneo e de Mockus têm tempos para a ponta semelhantes e mais curtos do que o hidrograma unitário sintético de Temez, tendo os hidrogramas unitários únicos e aplicáveis à região tempos para a ponta intermédios.

Os hidrogramas unitários observados, obtidos por resolução da equação da convolução discreta, recorrendo à minimização da soma dos quadrados dos erros da simulação dos caudais (com duas restrições e sobreposição dos acontecimentos hidrometeorológicos), os hidrogramas unitários agregados de Clark (Liu, *et al.*, 2003), o hidrograma unitário Específico e os hidrogramas unitários sintéticos de Temez (1978) e de SCS (1972 e 1973) foram adotados para a modelação precipitação-escoamento dos acontecimentos hidrometeorológicos, a realizar através do programa informático HEC-HMS versão 3.5 (2010).

Selecionaram-se os hidrogramas unitários observados obtidos pelo método de sobreposição dos acontecimentos hidrometeorológicos, em detrimento do método gráfico, visto este considerar, simultaneamente, a totalidade da informação hidrométrica (caudais) e meteorológica (precipitações). Na simulação hidrológica será utilizado o método de perdas SCS, uma vez que este resultou nas menores médias do somatório do quadrado dos erros, processo matemático que suporta a determinação dos hidrogramas unitários observados. Para realizar a simulação hidrológica, selecionou-se, entre os vários hidrogramas unitários agregados de Clark, o proposto por Liu, *et al.* (2003), com raio hidráulico unitário na secção de referência da bacia hidrográfica, porque as durações totais dos diagramas tempo-área estão, geralmente, mais próximas das médias dos tempos de concentração obtidos pela avaliação dos acontecimentos hidrometeorológicos analisados nas cinco bacias hidrográficas.

Para as bacias hidrográficas definidas em Colares e Ponte Zambujal serão utilizados os hidrogramas unitários sintéticos aplicáveis à região, ajustados a cada uma das bacias hidrográficas, e os seus caudais de ponta serão comparados com os melhores resultados dos hidrogramas unitários sintéticos (Temez ou SCS) obtidos nas bacias avaliadas com dados hidrométricos.

5. MODELAÇÃO PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO

5.1. Modelação hidrológica através do HEC-HMS

Selecionou-se o programa HEC-HMS, versão 3.5 (2010), desenvolvido no *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *Army Corps of Engineers* dos Estados Unidos da América (USACE, 2010), para estabelecer o modelo hidrológico de acontecimento, determinístico, a utilizar na simulação das relações precipitação - escoamento nas bacias em estudo. Esta escolha deve-se a que este programa vem sendo desenvolvido desde 1964, originalmente sob o nome de HEC-1, sendo utilizado e validado em todo o mundo e que, dada a multiplicidade de submodelos que podem ser escolhidos na modelação dos diferentes processos hidrológicos, permite uma enorme flexibilidade, pois é ajustável ao tipo e qualidade de dados de que se dispõe ou à aplicabilidade dos métodos.

5.2. Referência sumária dos modelos hidrológicos no HEC-HMS, relevantes para a prossecução do estudo

O HEC-HMS, versão 3.5 (2010) permite modelar hidrologicamente as bacias hidrográficas utilizando as variáveis intervenientes de forma desagregada (grelha) ou agregada (que poderá resultar da existência de apenas um valor pontual ou de cálculo prévio de um valor médio associado a uma determinada área) espacialmente, sendo a opção função dos dados disponíveis. Este programa, utilizado para modelação de acontecimento, necessita de informação sobre algumas características fisiográficas da bacia hidrográfica, por exemplo, a sua área e as condições iniciais do estado de armazenamento de água no solo.

No HEC-HMS, versão 3.5 (2010), é possível utilizar dados de entrada na bacia de dois tipos: reais, obtidos a partir dos registos dos udógrafos ou através dos estimados a partir do radar meteorológico, e sintéticos (ou de projeto), derivados de informação construída a partir da análise de registos de precipitação históricos (e.g., mapas com isoietas para diferentes durações, curvas de possibilidade udométrica para diferentes períodos de retorno, ou hietogramas obtidos a partir de curvas de duração temporal de precipitação hipotéticas, e.g. as curvas propostas pelo SCS, para precipitação de 24 h, de diferentes tipos). Neste estudo, a precipitação considerada é um valor agregado que corresponde à precipitação média horária ponderada sobre a bacia, determinada através do método dos Polígonos de Thiessen, do IDW2-6 (capítulo 2) e a partir da calibração da informação do radar meteorológico (capítulo 3). Neste estudo, a modelação realizada através do método de Clark não considera a resposta da bacia a uma precipitação sobre as áreas centrada em volta da isócrona, traduzindo uma precipitação desagregada espacialmente, mas considera a resposta da bacia a uma precipitação agregada transformada pelo diagrama tempo-área (capítulo 4).

O HEC-HMS, versão 3.5 (2010) disponibiliza, para transformar a precipitação total em precipitação útil (volume equivalente ao escoamento direto), diversos métodos: três centram-se na modelação da infiltração originalmente deduzida a nível de uma coluna de solo (Horton, formulação de base empírica, Green-Ampt, formulação semi-empírica, e Smith e Parlange, formulação de base física) e que dependem explicitamente das características e uso do solo e do seu estado de humedecimento no início da chuvada; outros três simulam o conjunto das perdas (interceção, infiltração e retenção superficial de água na bacia hidrográfica) diretamente a nível da bacia hidrográfica (método do índice Φ , SCS). No presente estudo foram adotados os métodos que

avaliar as perdas totais ao nível da bacia hidrográfica, tendo sido selecionado para realizar a simulação o método das perdas segundo o SCS, por corresponder àquele que conduz a menores desvios entre o hidrograma observado e o estimado pelo método do hidrograma unitário através do método de sobreposição dos acontecimentos hidrometeorológicos (capítulo 4).

Como o hidrograma de cheia se pode considerar simplificadaamente como a soma do escoamento direto com o escoamento de base, este último, que depende das características geológicas das bacias hidrográficas, tem de ser simulado. Entre os cinco métodos propostos pelo HEC-HMS (2010) para caracterizar o escoamento de base estão: a) identificação de vários caudais de base no instante t_0 para cada mês ao longo do ano e de uma constante de recessão da curva de esgotamento do aquífero, utilizável para modelação contínua com condições pré-estabelecidas; b) adoção de um caudal de base no instante t_0 para cada mês do ano, sem considerar curva de esgotamento (escoamento de base constante); c) utilização do método do reservatório linear para descrever o escoamento de base, sendo necessário identificar o caudal inicial de base e o coeficiente de reservatório linear; d) descrição do escoamento de base através do método não linear de *Boussinesq*, adequado a aquíferos com pequena variação espacial da carga hidráulica; e) caracterização do escoamento de base baseado na utilização da curva de esgotamento do aquífero (modelo exponencial), sendo necessário identificar o caudal de base no instante t_0 , a constante de recessão e o caudal de início de recessão (Fig. 5.1). A constante de recessão do HEC-HMS, versão 3.5 (2010) é estimada através da razão entre o caudal de base no instante atual e o caudal de base ocorrido há 24 horas (HEC-HMS, 2010). Este último método foi escolhido no presente estudo porque a informação necessária à sua caracterização foi determinada aquando da análise hidrológica dos acontecimentos hidrometeorológicos de suporte à determinação dos hidrogramas unitários (capítulo 4). A aplicação deste método permite, também, separar escoamento direto do escoamento de base.

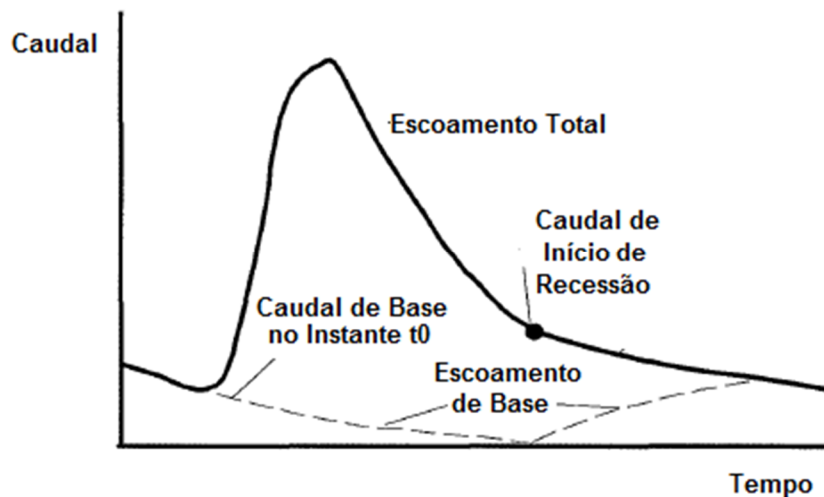


Figura 5.1 – Representação do modelo de escoamento de base exponencial (adaptado de HEC-HMS, 2000).

O programa HEC-HMS, versão 3.5 (2010) inclui várias hipóteses que visam transformar a precipitação útil em escoamento direto: hidrograma unitário de Clark (baseia-se no diagrama área-tempo), onda cinemática, ModClark (representa a bacia hidrográfica por uma grelha de células e recorre ao tempo de percurso e aos coeficientes de armazenamento associados a cada célula da grelha), hidrograma unitário do SCS, hidrograma unitário de Snyder e hidrograma unitário específico. Neste capítulo são aplicados hidrogramas unitários determinados no capítulo 4 e outros disponíveis no programa HEC-HMS, versão 3.5: SCS (1972, 1973); Temez

(1978), Clark (associados aos diagramas tempo-área determinados no capítulo 4), hidrogramas unitários observados e hidrogramas unitários Específicos, associados a cada uma das bacias hidrográficas em análise.

5.3. Informação das bacias hidrográficas de suporte à modelação hidrológica

A modelação hidrológica dos acontecimentos hidrometeorológicos das sete bacias hidrográficas selecionadas no capítulo 2, efetuou-se mediante duas perspetivas: a primeira, só possível quando são conhecidos os dados de precipitação e de caudal, corresponde à calibração do modelo, isto é, à estimativa do conjunto de parâmetros associados à modelação dos diferentes processos hidrológicos responsáveis pela transformação da precipitação em caudal, efetuada de modo a minimizar a diferença entre os escoamentos observados e os estimados pelo modelo, a segunda, relativa à utilização do modelo em modo de simulação. Neste caso, a simulação pode ser efetuada em bacias em que a calibração foi previamente realizada, com o objetivo da sua validação ou de simulação de eventos futuros, ou então quando não existem caudais observados e os parâmetros do modelo têm primeiro de ser obtidos de forma sintética. Neste estudo, a simulação com os parâmetros hidrológicos previamente calibrados permitiu escolher qual a combinação da distribuição espaço temporal da precipitação com o tipo de hidrograma unitário que melhor ajustamento possibilita entre os caudais observados e simulados, durante os acontecimentos hidrometeorológicos analisados. Nesta simulação recorre-se aos mesmos acontecimentos hidrometeorológicos selecionadas para determinar os hidrogramas unitários, baseados na precipitação média na área de cada bacia hidrográfica, face ao reduzido número de acontecimento associados a cada uma das bacias. A qualidade destes ajustamentos é avaliada através de diversas estatísticas.

No capítulo 2, as sete bacias hidrográficas que se pretende modelar hidrológicamente (Quadro 2.1) foram identificadas e caracterizadas em termos fisiográficos, recorrendo ao programa informático *Arcview*, ao *MET* e a um programa informático desenvolvido para o efeito.

Nos capítulos 2 e 3 procedeu-se à caracterização espaço temporal da precipitação média sobre a área das bacias hidrográficas, através dos Polígonos de Thiessen, IDW2-6 ou de relações $U-R$, sendo U e R , respetivamente, a precipitação média na área determinada a partir da informação dos udógrafos e do radar meteorológico, associadas fundamentalmente aos acontecimentos hidrometeorológicos de base à determinação dos hidrogramas unitários (Quadro 2.12). Na Fig. 5.2 apresentam-se, para cada bacia hidrográfica, as relações entre as precipitações horárias médias sobre a área da bacia fornecidas pelo radar meteorológico com calibração com os dados dos udógrafos, e fornecidas pelo radar meteorológico sem calibração. Os valores médios em área foram obtidos por dois métodos alternativos: IDW2-6 e Polígonos de Thiessen (sem considerar os valores de 2003). É nítida a grande diferença entre os valores iniciais do radar e os ajustados, independentemente do método utilizado para estimar os valores médios nas áreas, sendo que existem diferenças entre as calibrações dependendo da bacia hidrográfica em análise. Estas distribuições espaciais diferenciadas serão incorporadas na modelação hidrológica.

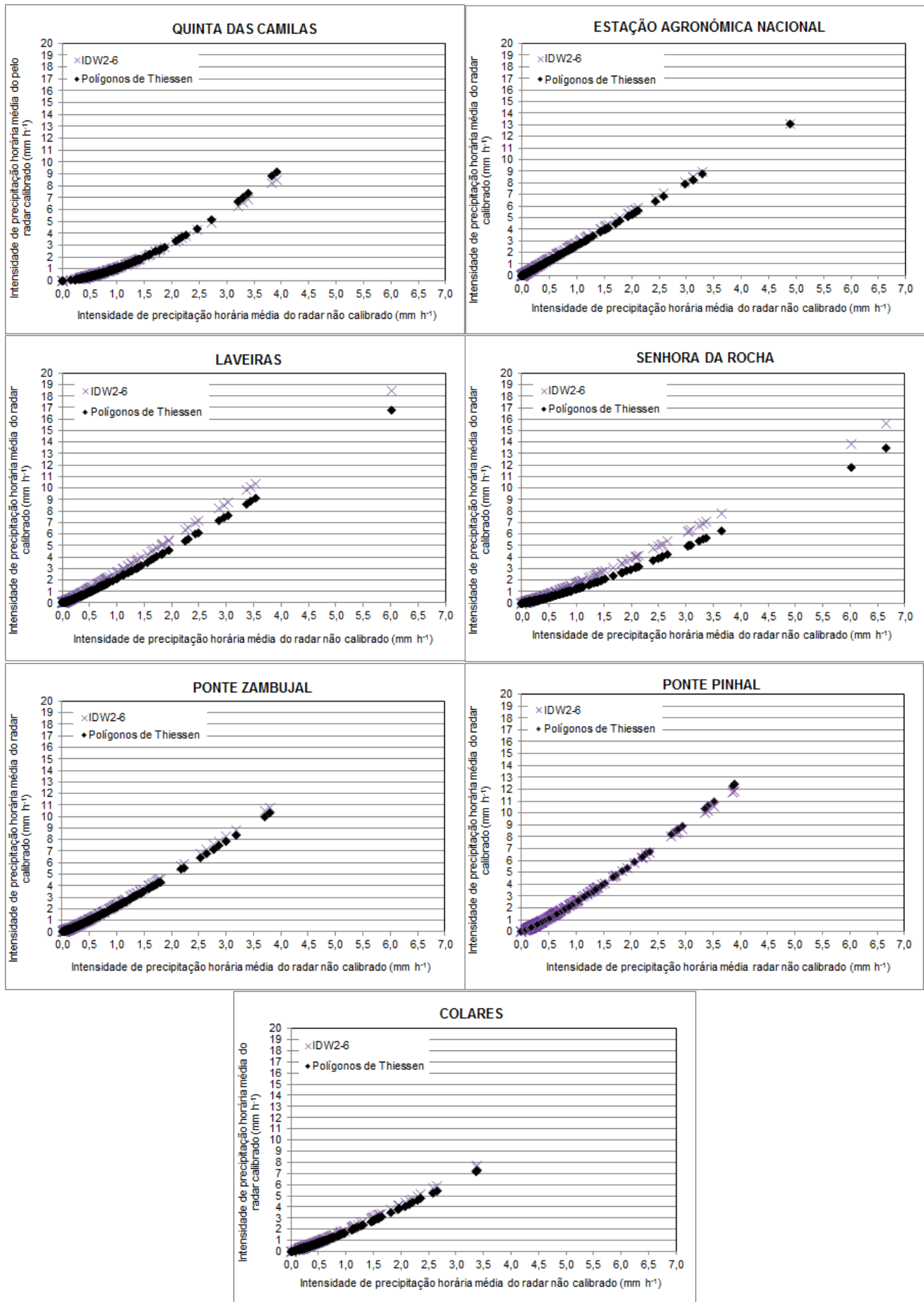


Figura 5.2 – Intensidades de precipitação horárias médias calibradas e não calibradas, associadas às sete bacias hidrográficas, definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Zambujal, Ponte Pinhal e Colares, com valores médios em área estimados por IDW2-6 e por Polígonos de Thiessen.

No **Anexo 2 e 3** indicam-se os dados hidrometeorológicos utilizados na determinação dos hidrogramas unitários e na modelação, incluindo os dados associados aos eventos chuvosos não usados na estimativa dos hidrogramas, ora por falta de registos hidrométricos (Ponte Zambujal) ora por insuficiência de caudal (Colares).

A modelação hidrológica é realizada apenas para os acontecimentos pluviosos seleccionados para análise hidrológica (considerando a informação indicada no capítulo 2, Quadro 2.9), sendo que só alguns dos acontecimentos têm dados do radar meteorológico (capítulo 2, Quadro 2.12). No capítulo 4 procedeu-se à identificação de 68 acontecimentos hidrometeorológicos relevantes, que apresentam caudais superiores a $1,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e coeficiente de escoamento superior a 0,04, sendo que os acontecimentos de 2005 e 2003 não têm dados de radar meteorológico ou os dados de radar não refletem as atuais condições de funcionamento do radar, respetivamente.

Neste contexto, identificaram-se os acontecimentos ocorridos em 2006 e em 2008 com registos de radar meteorológico, visando comparar as precipitações totais ponderadas nas sete bacias hidrográficas (isto é, o somatório da precipitação horária em cada acontecimento) obtidas pelos Polígonos de Thiessen, pelo IDW2-6 e pelas estimadas a partir das duas calibrações espaciais do radar meteorológico com os valores do radar meteorológico disponibilizados pelo IPMA (isto é, sem calibração com udógrafos). Os acontecimentos pluviosos com simultaneidade de registos do radar meteorológico e dos udógrafos são 18/02/2008, 16/11/2006, 24/11/2006, 27-28/11/2006, 16/10/2006, 18/10/2006 e 25/10/2006. No entanto, nem todos os acontecimentos são completamente abrangidos pelos registos do radar, pelo que existem lacunas ao longo do período temporal do acontecimento pluvioso utilizado para determinar os hidrogramas unitários, sendo apenas considerados nesta modelação hidrológica os registos que abrangem todo o período com precipitação observada: 18/02/2008 (Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional e Laveiras), 24/11/2006 (Quinta das Camilas, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal) e 27-28/11/2006 (Camilas e Senhora da Rocha).

Nesta análise inclui-se, também, os acontecimentos pluviosos com uma ou duas horas em falta preenchidas com valores nulos: 27-28/11/2006 (Estação Agronómica Nacional e Laveiras) e 16/11/2006 (Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal). As falhas de dados do radar são preenchidas com valores nulos, porque nestes instantes temporais, apesar de abrangidos no acontecimento pluvioso, não tinham sido identificadas como associadas à ocorrência de chuva. Assim sendo, no total poder-se-á considerar a existência de quatro acontecimentos hidrometeorológicos em que é possível simular hidrologicamente utilizando a caracterização espacial da precipitação fornecida pelos polígonos de Thiessen, por IDW2-6 e pelos dois tipos de calibração dos dados do radar meteorológico.

Na Fig 5.3 apresentam-se as precipitações totais, por acontecimento hidrometeorológico e por bacia hidrográfica, estimadas pelos Polígonos de Thiessen e IDW2-6, suportados pelos dados udográficos, e radar calibrado pelos registos dos udógrafos e não calibrado.

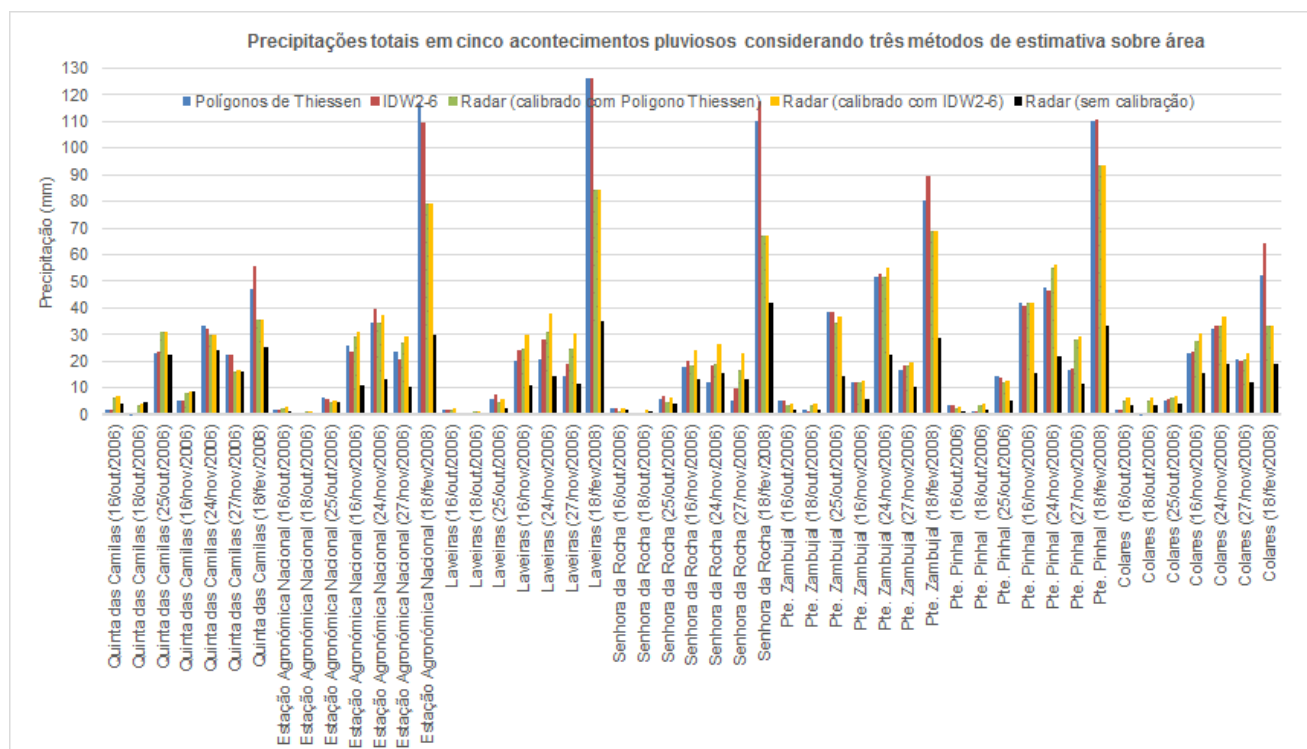


Figura 5.3 – Estimativas da precipitação total associada aos acontecimentos pluviosos selecionados para a modelação hidrológica das sete bacias hidrográficas, definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Zambujal, Ponte Pinhal e Colares, utilizando diferentes métodos de cálculo da precipitação média em área.

As calibrações dos dados do radar meteorológico conduziram a alterações significativas das estimativas das precipitações (capítulo 3) e, visto aproximarem-se mais das estimativas baseadas na rede udográfica, foram utilizadas na modelação hidrológica. A calibração das estimativas de intensidade de precipitação horária obtidas pelo radar, nas várias bacias hidrográficas, diminui as diferenças entre os valores do radar (que estavam muito subestimados) e as estimativas de precipitação espacial obtidas por aplicação de Polígonos de Thiessen ou de IDW2-6.

Considerando as precipitações totais dos sete acontecimentos pluviosos nas sete bacias hidrográficas, a razão média entre as estimativas do radar meteorológico calibrado com os Polígonos de Thiessen e do radar meteorológico sem calibração é igual a 2,0 e entre o radar meteorológico calibrado com IDW2-6 e o radar meteorológico sem calibração é igual 2,1.

Considerando a mesma amostra de acontecimentos pluviosos nas sete bacias hidrográficas, o quociente entre as precipitações totais estimadas através de Polígonos de Thiessen e através de IDW2-6, ambos os métodos baseados nos dados udográficos, tem o valor unitário. Complementarmente, verifica-se que as relações obtidas no subcapítulo 2.6, entre a precipitação horária nas áreas das sete bacias hidrográficas obtidas pelos Polígonos de Thiessen e por IDW2-6, associados à totalidade dos acontecimentos avaliados no capítulo 4, estão muito próximas da unidade, com coeficientes de determinação superiores 0,97. Face aos resultados destas duas análises (precipitações horárias e totais), conclui-se que os dois métodos de caracterização espacial da precipitação (Polígonos de Thiessen e IDW2-6) descrevem a realidade meteorológica de forma equivalente.

Face ao exposto, a simulação hidrológica dos acontecimentos hidrometeorológicos é efetuada com a informação horária média do radar meteorológico calibrado através dos Polígonos de Thiessen e de IDW2-6 e

da precipitação horária média na área estimada pelos Polígonos de Thiessen, que, também, suporta a determinação dos hidrogramas unitários (capítulo 4).

Os acontecimentos de 2003 serão simulados, mas o seu resultado será avaliado considerando que estes foram caracterizados com menor informação relativa à precipitação registada nos udógrafos. Por outro lado, não serão simulados com os dados do radar visto estes não refletirem a calibração atualmente utilizada pelo IPMA, I.P. (capítulo 3).

Em conclusão, na simulação da modelação hidrológica, que visa selecionar o hidrograma unitário que melhor reproduz os caudais observados, são considerados os 68 acontecimentos hidrometeorológicos analisados no capítulo 4, distribuídos do seguinte modo: 15 Quinta das Camilas; 16 Estação Agronómica Nacional, 16 Laveiras, 6 Senhora da Rocha e 15 Ponte Pinhal. No processo de simulação hidrológica foram agrupados alguns acontecimentos, pelo que são simulados 62 períodos temporais (Quadro 5.1).

Quadro 5.1 – Síntese dos cenários a incluir na modelação (simulação) para as sete bacias hidrográficas em análise.

Acontecimentos hidrometeorológicos	Identificação dos períodos simulados	Estação hidrométrica SNIRH				
		Quinta das Camilas	Estação Agronómica Nacional	Laveiras	Senhora da Rocha	Ponte Pinhal
18/fev/2008	18/fev/2008	RC+TP	RC+TP	RC+TP	TP*	TP*
16/nov/2006	16/nov/2006	RC+TP	RC+TP	TP	-	RC+TP
24/nov/2006	24/nov/2006	RC+TP	TP	TP*	RC+TP	RC+TP
27-28/nov/2006	27-28/nov/2006	RC+TP	RC+TP	RC+TP	RC+TP	TP*
16/out/2006	16/out/2006	TP	TP	TP	-	-
18/out/2006	18/out/2006	TP	TP	TP	-	-
20/out/2006	20/out/2006	TP	TP	TP	TP	TP
22/out/2006	22-23/out/2006	TP	TP	TP	TP	TP
23/out/2006						
25/out/2006	25/out/2006	TP	TP	TP	TP	TP
26/out/2006	26/out/2006	TP	TP	TP	-	TP
03/nov/2005	03/nov/2005	TP	TP	-	-	TP
20/nov/2005	19-21/nov/2005	TP	-	-	-	TP
21/nov/2005			-	-	-	
01/out/2003	1-2/out/2003	-	TP	TP	-	-
02/out/2003		-			-	-
12/out/2003	12/out/2003	-	TP	TP	-	-
25/out/2003	25/out/2003	TP	-	TP	-	TP
27/out/2003	27/out/2003	-	TP	TP	-	TP
31/out/2003	31/out/2003	-	TP	TP	-	TP
Total de períodos simulados		13TP + 8RC	15TP + 6RC	15TP + 4RC	6TP + 4RC	13TP + 4RC

Legenda: Cenários de distribuição espacial da precipitação: TP - Polígonos de Thiessen, IDW2-6 – Inverse Distance Weighted; RC - radar calibrado com TP e IDW2-6; (-) – Acontecimento hidrometeorológico não selecionado no capítulo 4 para obtenção dos hidrogramas unitários observados e, por isso, não modelado hidrológicamente; (*) – Com falhas nos dados de radar superiores a duas horas.

Conforme referido no subcapítulo anterior, a modelação implica determinar algumas das características fisiográficas das bacias hidrográficas, sendo que as relevantes para a utilização do programa HEC-HMS (2010) são a áreas da bacia hidrográfica e a área urbana (que representa a área impermeabilizada da bacia hidrográfica considerada), apresentadas no Quadro 5.2 e já referenciada em capítulos anteriores.

Quadro 5.2 – Características fisiográficas das sete bacias hidrográficas em análise e a utilizar na modelação.

Estação hidrométrica SNIRH	Área da bacia hidrográfica (Quadro 2.1)	Área urbana (Quadro 4.17)
	(km ²)	(%)
Quinta das Camilas	10,4	45,172
Estação Agronómica Nacional	37,5	58,650
Laveiras	33,2	48,729
Senhora da Rocha	41,4	43,109
Ponte Zambujal	99,1	12,682
Ponte Pinhal	77,6	14,755
Colares	32,3	22,159

No processo de determinação dos diversos hidrogramas unitários (capítulo 4) procedeu-se ao cálculo das variáveis ou parâmetros hidrológicos, associados a cada uma das bacias hidrográficas a modelar hidrológicamente, cujos valores médios são utilizados como dados de entrada no programa HEC-HMS, versão 3.5 (2010).

No Quadro 5.3 indicam-se as variáveis iniciais a utilizar na modelação do escoamento de base das sete bacias hidrográficas (modelo exponencial), nomeadamente, o coeficiente de exaurimento ou de esgotamento (α), a constante de recessão do HEC-HMS (2010), o caudal de base no instante t_0 (Q_{b0}) e o caudal de início de recessão (Q_r). Os valores apresentados resultam da média da análise dos acontecimentos hidrometeorológicos selecionados no capítulo 4.

Quadro 5.3 – Características do escoamento de base médias das sete bacias hidrográficas em análise e a utilizar na modelação.

Estação hidrométrica SNIRH	Coeficiente de exaurimento (α)	Constante de recessão do HEC-HMS (2010)	Caudal de base no instante t_0 (Q_{b0})	Caudal de início de recessão (Q_r)
	(Quadro 4.9)		(Quadro 4.9)	(Quadro 4.9)
	(h ⁻¹)	(-)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)
Quinta das Camilas	0,04	0,79	2,00	3,55
Estação Agronómica Nacional	0,05	0,74	1,83	3,08
Laveiras	0,06	0,43	0,48	1,11
Senhora da Rocha	0,52	0,01	0,01	0,10
Ponte Zambujal	0,14*	0,53*	1,30*	2,14*
Ponte Pinhal	0,05	0,71	2,20	2,87
Colares	0,14*	0,53*	1,30*	2,14*

Legenda: * - Valor obtido pela média das restantes cinco bacias hidrográficas.

No Quadro 5.4 apresentam-se, para as sete bacias hidrográficas, as características hidrológicas a utilizar na modelação hidrológica das perdas, associadas aos diversos hidrogramas unitários utilizados no presente estudo. Os valores apresentados resultam da média da análise dos acontecimentos hidrometeorológicos selecionados no capítulo 4 e da aplicação das equações específicas do SCS e Temez, estes últimos aplicados na modelação recorrendo aos hidrogramas unitários segundo estes métodos.

Quadro 5.4 – Características médias sobre as perdas das sete bacias hidrográficas em análise e a utilizar na modelação.

Estação hidrométrica SNIRH	Hidrograma Unitário Observado, Específico e Clark (Liu, <i>et al.</i> , 2003)		Hidrogramas Unitários SCS e Temez	
	Perdas iniciais observadas	N Calibrado	N Inicial AMC _{II}	Perdas iniciais estimadas pelo SCS
	(Quadro 4.10)	(Quadro 4.10)	(Quadro 2.1)	Eq. (4.5)
	(mm)	(-)	(-)	(mm)
Quinta das Camilas	2,19	87,64	81,99	11,16
Estação Agronómica Nacional	1,71	90,20	85,12	8,88
Laveiras	1,26	91,64	78,62	13,81
Senhora da Rocha	4,08	72,23	78,28	14,10
Ponte Zambujal	2,80*	80,93**	80,93	11,97
Ponte Pinhal	4,78	76,59	77,23	14,97
Colares	2,80*	70,24**	70,24	21,52

Legenda: * - Valor obtido pela média das restantes cinco bacias hidrográficas; **-Correspondem ao Número de Escoamento (N) inicial.

No Quadro 5.5 são indicados, para cada bacia hidrográfica, os tempos de atraso estimado pelo SCS (t_d), que são utilizados pelo hidrograma unitário do SCS (Quadro 4.2, Eq. (4.17)). Neste processo adotou-se os tempos de atrasos estimados considerando o número de escoamento associado a AMC_{III}, visto serem as condições, em média, mais semelhantes às situação hidrológicas dos acontecimentos hidrometeorológicos a simular. Por outro lado, os tempos para a ponta (t_p) obtidos recorrendo a estes tempos de atraso conduzem a valores mais próximos das duas horas, valor de tempo para a ponta do hidrograma unitário padronizado do SCS obtido na avaliação às cinco bacias hidrográficas.

Quadro 5.5 – Tempos de atraso das sete bacias hidrográficas, associados ao SCS, valores a utilizar na modelação.

Estação hidrométrica SNIRH	Hidrograma Unitário SCS
	Tempo de atraso estimado pelo SCS (t_d)
	Eq. (4.17)
	(h)
Quinta das Camilas	0,95
Estação Agronómica Nacional	1,87
Laveiras	2,20
Senhora da Rocha	1,79
Ponte Zambujal	1,79
Ponte Pinhal	1,71
Colares	1,47

Na modelação hidrológica das bacias hidrográficas em análise, a transformação da precipitação útil em escoamento direto é realizada recorrendo aos hidrogramas unitários do método SCS (Quadro 4.2), do método de Temez (Eqs. (4.25) a (4.29) e **Anexo 13**), do hidrograma unitário Específico (alínea 4.1.3.7.), dos hidrogramas unitários observados, obtidos pelo método de sobreposição dos acontecimentos hidrometeorológicos, e dos hidrogramas unitários segundo Clark (Liu, *et al.*, 2003). A modelação hidrológica através dos hidrogramas unitários segundo Clark utiliza os diagramas tempo-área resultantes da aplicação do método de Liu, *et al.* (2003), associadas à formulação original do método, onde é unitário o raio hidráulico da secção de referência (**Anexo 17**).

No Quadro 5.6 indicam-se as coordenadas dos hidrograma unitário para uma precipitação útil de 1 mm a utilizar na simulação, com exceção dos hidrogramas unitários de Temez e SCS. Os três tipos dos hidrogramas unitários indicados neste quadro foram obtidos considerando as perdas segundo SCS. No programa HEC-HMS, versão 3.5 (2010), são introduzidas as ordenadas e as abcissas dos hidrogramas unitários acima referidos e do hidrograma unitário de Temez, exceto o hidrograma unitário segundo SCS, que está incluído neste programa informático.

Face ao exposto, são realizadas 440 simulações hidrológicas, que abrangem as seguintes condições:

- Distribuição espaço-temporal da precipitação (cenários meteorológicos): Polígonos de Thiessen e radar meteorológico calibrado com Polígonos de Thiessen e IDW2-6.
- Hidrogramas unitários (cenários hidrológicos): observados obtidos pelo método de sobreposição dos acontecimentos hidrometeorológicos (perdas SCS), Específicos (obtidos a partir das características fisiográficas das bacias e considerando as perdas SCS), SCS, Temez e Clark (Liu, *et al.*, 2003, com perdas SCS).

As simulações realizadas, baseadas no 62 períodos temporais indicados no Quadro 5.1, estão associadas às bacias hidrográficas definidas nas cinco estações hidrométricas do seguinte modo:

- 105 simulações na Quinta das Camilas: 5 tipos de hidrogramas unitários combinados com 21 distribuições espaço-temporal;
- 105 simulações na Estação Agronómica Nacional: 5 tipos de hidrogramas unitários combinados com 21 distribuições espaço-temporal;
- 95 simulações em Laveiras: 5 tipos de hidrogramas unitários combinados com 19 distribuições espaço-temporal);
- 50 simulações na Senhora da Rocha: 5 tipos de hidrogramas unitários combinados com 10 distribuições espaço-temporal;
- 85 simulações em Ponte Pinhal: 5 tipos de hidrogramas unitários combinados com 17 distribuições espaço-temporal.

A simulação é também efetuada recorrendo à informação dos Polígonos de Thiessen, para oito acontecimentos sem caudais observados, associados às bacias hidrográficas definidas em Ponte Zambujal e Colares, correspondentes aos maiores valores de precipitação total registadas em 2008, 2006, 2005 e 2003 (um acontecimento por cada ano analisado).

Os acontecimentos hidrometeorológicos associados ao ano 2000/2001 não foram simulados, uma vez que não existem registos hidrométricos e a precipitação média ponderada utiliza no máximo apenas quatro estações udográficas, não permitindo escolher a melhor combinação da distribuição espaço temporal da precipitação com o tipo de hidrograma unitário (subcapítulos 2.3 e 2.6).

Quadro 5.6 – Hidrogramas unitários observados, Clark e Específicos, determinados para as cinco bacias hidrográficas analisadas, definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronômica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.

Tempo (h)	HU observado; Perdas SCS					HU Clark (Liu, et al., 2003); Perdas SCS					HU Específico; Perdas SCS				
	Quinta das Camilas	Estação Agronômica Nacional	Laveiras	Senhora da Rocha	Ponte Pinhal	Quinta das Camilas	Estação Agronômica Nacional	Laveiras	Senhora da Rocha	Ponte Pinhal	Quinta das Camilas	Estação Agronômica Nacional	Laveiras	Senhora da Rocha	Ponte Pinhal
	Q (m³ s⁻¹ por mm h⁻¹)														
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,188	0,619	0,438	1,333	0,257	0,763	2,451	2,437	5,210	1,418	0,515	1,813	0,991	1,181	4,057
2	1,146	4,316	5,420	6,881	7,079	0,585	2,350	2,355	3,619	3,634	1,141	4,296	5,467	6,956	7,063
3	0,715	3,548	1,704	3,274	5,849	0,414	1,674	1,556	1,560	5,698	0,773	2,816	2,370	2,920	5,384
4	0,375	0,195	0,325	0,000	3,452	0,287	1,165	1,009	0,651	5,446	0,323	1,091	0,362	0,416	2,928
5	0,257	0,498	1,036	-	2,519	0,201	0,809	0,650	0,270	2,927	0,103	0,317	0,031	0,033	1,323
6	0,109	0,384	0,183	-	0,000	0,139	0,559	0,419	0,112	1,323	0,028	0,077	0,002	0,000	0,531
7	0,093	0,235	0,000	-	0,000	0,096	0,386	0,270	0,046	0,581	0,007	0,016	0,000	-	0,197
8	0,007	0,274	0,117	-	0,000	0,066	0,267	0,174	0,019	0,254	0,001	0,003	-	-	0,069
9	0,000	0,001	0,000	-	0,000	0,046	0,185	0,112	0,008	0,111	0,000	0,001	-	-	0,023
10	-	0,000	-	-	0,659	0,032	0,128	0,072	0,003	0,049	-	0,000	-	-	0,007
11	-	0,216	-	-	0,340	0,022	0,088	0,047	0,001	0,021	-	-	-	-	0,002
12	-	0,142	-	-	0,393	0,015	0,061	0,030	0,001	0,009	-	-	-	-	0,001
13	-	0,000	-	-	0,510	0,010	0,042	0,019	0,000	0,004	-	-	-	-	0,000
14	-	-	-	-	0,116	0,007	0,029	0,012	-	0,002	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	0,133	0,005	0,020	0,008	-	0,001	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	0,181	0,003	0,014	0,005	-	0,000	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	0,075	0,002	0,010	0,003	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	0,000	0,002	0,007	0,002	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	0,001	0,005	0,001	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	0,001	0,003	0,001	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	0,001	0,002	0,001	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	0,000	0,002	0,000	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	0,000	-	-	-	-	-	-	-	-

Legenda: HU – Hidrograma unitário.

5.4. Seleção do modelo hidrológico

Pretende-se identificar, considerando os 68 acontecimentos hidrometeorológicos observados nas cinco bacias hidrográficas, qual o modelo de hidrograma unitário que melhor resposta dá em situação de alerta de cheia, isto é, que melhor reproduz o valor de caudal de ponta de cheia e o tempo para a ponta e, posteriormente a partir da modelação hidráulica, identificar as áreas que serão inundadas.

A modelação hidrológica das cinco bacias hidrográficas, sob a forma agregada, utilizou como dados de entrada a precipitação média horária na área, os hidrogramas unitários e os parâmetros hidrológicos e fisiográficos sintetizados no subcapítulo 5.3.

A avaliação da qualidade da simulação hidrológica recorreu a diversas estatísticas que comparam os hidrogramas observados e simulados, sendo que se atribuiu igual peso aos diversos acontecimentos. Estas estatísticas são: a Soma dos Resíduos - SR (*Total Residual*), a Média dos Resíduos Absolutos – MRA (*Average Absolute Residual*), expressas pelas Eqs. (5.1) e (5.2) e disponíveis no módulo de simulação do HEC-HMS, versão 3.5 (2010), o Somatório do Quadrado dos Resíduos - SQR (Diskin e Simon, 1977) e a Percentagem do Erro do caudal de ponta - PEQ_p, definidos respetivamente pelas Eqs. (5.3) e (5.4) (definidas em HEC-HMS, 2000). Para melhor avaliar o ajustamento do hidrograma simulado ao observado foi determinada, também, a Percentagem do Erro do Tempo da ponta - PET_p, expresso pela Eq. (5.5). Um melhor ajustamento corresponde a um valor mais baixo de qualquer uma das estatísticas.

$$SR = \sum \frac{3600(Q_{si} - Q_{ob})}{1000A} \quad (5.1)$$

$$MRA = \sum \left| \frac{Q_{si} - Q_{ob}}{N_Q} \right| \quad (5.2)$$

$$SQR = \sum (Q_{ob} - Q_{si})^2 \quad (5.3)$$

$$PEQ_p = 100 \left| \frac{Q_{psi} - Q_{pob}}{Q_{pob}} \right| \quad (5.4)$$

$$PET_p = 100 \left| \frac{\sum \left(\frac{T_{psi} - T_{pob}}{T_{pob}} \right)}{npi} \right| \quad (5.5)$$

sendo Q_{ob} o caudal observado ($m^3 s^{-1}$), Q_{si} o caudal simulado ($m^3 s^{-1}$), A a área da bacia hidrográfica (km^2), N_Q o número de ordenadas do hidrograma simulado, Q_{pob} o caudal de ponta máximo observado ($m^3 s^{-1}$), Q_{psi} o caudal de ponta máximo simulado ($m^3 s^{-1}$), T_{psi} e T_{pob} tempo para os picos simulados e picos observados, respetivamente, e npi o número de picos no período do hidrograma simulado.

A determinação do tempo para a ponta foi precedido pela identificação do instante em que ocorre o caudal de ponta observado. Por vezes, ao longo do período simulado observam-se vários picos e, assim sendo, efetuou-se a identificação dos vários instantes em que ocorrem os picos (o maior pico corresponde ao caudal de ponta). A avaliação das diferenças temporais entre os picos simulados e os observados efetua-se através da aplicação da Eq. (5.5). Para aplicar a Eq. (5.5) é necessário identificar os instantes dos picos observados no hidrograma total e os instantes dos picos simulados através de:

- Os picos de caudal observados são identificados por uma subida seguida de uma descida dos caudais.
- As variações dos caudais são superiores ou iguais a $0,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- No caso de existência de um patamar máximo de caudal (picos iguais em horas consecutivas), a avaliação da subida e da descida foi analisada para os instantes anteriores e posteriores a esse patamar.
- Os tempos para os picos simulados são comparados com os tempos para os picos dos caudais observados, considerando os instantes temporais dos picos dos caudais simulados mais próximos do instante do pico observado.
- No caso de igualdade do intervalo temporal anterior e posterior ao pico do caudal simulado em relação ao instante do pico do caudal observado, seleciona-se o instante temporal mais cedo do pico do caudal simulado.
- Quando a aplicação de um determinado hidrograma unitário não simula um determinado pico do hidrograma total observado, assume-se que o pico não reproduzido é representado pelo pico de caudal simulado mais próximo do observado e em caso de igualdade (anterior ou posterior) assume-se o instante do pico simulado mais cedo.

Para além das estatísticas de avaliação acima indicadas, disponíveis no programa HEC-HMS, versão 3.5 (2010), foi estimado o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe - NS (1970), que é definido pela Eq. (5.6):

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{ob} - Q_{si})^2}{\sum (Q_{ob} - \overline{Q_{ob}})^2} \quad (5.6)$$

sendo, $\overline{Q_{ob}}$ o caudal médio observado no período temporal em análise. Os valores deste coeficiente podem variar entre $-\infty$ a 1. Uma eficiência de um (1) significa existir uma correspondência perfeita entre os valores observados e os valores simulados. Uma eficiência de zero (0) significa que as estimativas do modelo são tão precisas como a média dos dados observados, enquanto uma eficiência menor do que zero ocorre quando a média observada é um estimador melhor do que o modelo (modelo não adequado).

No **Anexo 19** apresentam-se os valores observados para estas estatísticas de avaliação do ajustamento, resultantes da simulação dos diferentes acontecimentos hidrometeorológicos, para as cinco bacias hidrográficas, que suportam a seleção do hidrograma unitário representativo das bacias hidrográficas avaliadas, e, no **Anexo 20**, apresentam-se os hidrogramas observados e os simulados.

A seleção dos melhores hidrogramas unitários resulta da valoração dos hidrogramas unitários com melhores resultados nas estatísticas de avaliação do ajustamento, considerando a distribuição espacial da precipitação caracterizada pelos Polígonos de Thiessen, radar calibrado com os Polígonos de Thiessen e com o IDW2-6. Nesta seleção, os melhores hidrogramas unitários foram identificados considerando dois aspetos:

- a) Os resultados obtidos nas quatro estatísticas de avaliação do ajustamento relativo à comparação entre os caudais observados e simulados, expressas pelas Eqs. (5.1) a (5.3) e (5.6). Para cada período simulado é identificado o tipo de hidrograma unitário associado ao melhor resultado obtido com cada estatística, sendo-lhe atribuída uma pontuação de 1,0 (o melhor resultado), sendo que os restantes hidrogramas (os piores resultados) são valorados em zero. Quando, no mesmo período avaliado, uma determinada estatística é, simultaneamente, a melhor em mais de um tipo de hidrograma unitário, o valor unitário é dividido pelo número hidrogramas com a melhor estatística.
- b) Os resultados obtidos nas duas estatísticas de avaliação do ajustamento relativo à comparação entre características associadas ao caudal de ponta, expressas pelas Eqs. (5.4) e (5.5). Para cada período simulado é identificado o hidrograma unitário associado ao melhor resultado obtido com cada estatística, ao qual é atribuído o valor unitário, sendo que os restantes hidrogramas unitários são valorados em zero. No caso de existirem vários hidrogramas unitários com resultados igualmente melhores, o valor unitário é dividido equitativamente pelos vários hidrogramas selecionáveis.

Após contabilização dos hidrogramas unitários com melhores resultados nas diversas estatísticas esta é convertida em percentagem, sendo possível comparar as incidências associadas às cinco bacias hidrográficas.

No Quadro 5.7 apresenta-se a avaliação da incidência dos melhores valores das estatísticas de avaliação do ajustamento entre o hidrograma observado e simulado (Quadro 5.1). Face aos resultados obtidos, os mais frequentemente selecionados por produzirem melhores simulações são os hidrogramas unitários de Temez. Neste quadro distinguem-se a valorização das estatísticas determinadas no ambiente HEC-HMS (SR, MRA) ou fora do ambiente HEC-HMS, versão 3.5 (SQR e NS). Os valores totais das estatísticas correspondem ao número de vezes que um determinado hidrograma unitário foi selecionado, para cada estatística de avaliação, em relação aos 62 períodos simulados com precipitação obtida pelos Polígonos de Thiessen.

Quadro 5.7 – Resultados das estatísticas de avaliação da simulação dos hidrogramas observados a partir dos hidrogramas unitários estimados para as bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronômica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal (SR, MRA, SQR e NS).

Distribuição espacial segundo TP	Estatísticas	Hidrogramas unitários					Total de acontecimentos simulados
		SCS	Temez	Observado	Específico	Clark (Liu, et al., 2003)	
Quinta das Camilas	SR (mm)	8%	23%	8%	15%	<u>46%</u>	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0%	0%	15%	38%	<u>46%</u>	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0%	0%	15%	31%	<u>54%</u>	100%
	NS (-)	0%	0%	15%	31%	<u>54%</u>	100%
Estação Agronômica Nacional	SR (mm)	7%	<u>73%</u>	7%	7%	7%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	20%	<u>80%</u>	0%	0%	0%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	13%	<u>80%</u>	0%	0%	7%	100%
	NS (-)	13%	<u>80%</u>	0%	0%	7%	100%
Laveiras	SR (mm)	<u>37%</u>	23%	13%	20%	7%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	<u>40%</u>	27%	7%	20%	7%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	<u>53%</u>	13%	0%	27%	7%	100%
	NS (-)	<u>53%</u>	13%	0%	27%	7%	100%
Senhora da Rocha	SR (mm)	0%	<u>100%</u>	0%	0%	0%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0%	<u>100%</u>	0%	0%	0%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	50%	<u>33%</u>	17%	0%	0%	100%
	NS (-)	50%	<u>33%</u>	17%	0%	0%	100%
Ponte Pinhal	SR (mm)	8%	<u>62%</u>	15%	15%	0%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	8%	<u>46%</u>	15%	0%	31%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0%	<u>62%</u>	23%	0%	15%	100%
	NS (-)	0%	<u>62%</u>	23%	0%	15%	100%
Total	SR (mm)	14%	<u>51%</u>	10%	13%	13%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	16%	<u>45%</u>	8%	13%	18%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	21%	<u>39%</u>	10%	13%	18%	100%
	NS (-)	21%	<u>39%</u>	10%	13%	18%	100%

Legenda: TP - Polígonos de Thiessen.

A avaliação do ajustamento associado ao caudal máximo, que recorre às estatísticas PEQ_p e PET_p , identifica como melhores resultados os obtidos a partir da aplicação do hidrograma unitário de Temez e Específico (Quadro 5.8). A diferença de incidência na seleção do hidrograma unitário de Temez, em relação à avaliação do ajustamento do hidrograma total simulado (Quadro 5.7), resulta do aumento da incidência da escolha do hidrograma unitário Específico.

Quadro 5.8 – Resultados das estatísticas de avaliação da simulação dos hidrogramas observados a partir dos cinco hidrogramas unitários estimados para as bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal (PEQ_p e PET_p).

Distribuição espacial segundo TP	Estatísticas	Hidrogramas unitários					Total de acontecimentos simulados
		SCS	Temez	Observado	Específico	Clark (Liu, et al., 2003)	
Quinta das Camilas	PEQp (%);	0%	23%	0%	23%	54%	100%
	PETp (%)	0%	13%	50%	35%	3%	100%
Estação Agronómica Nacional	PEQp (%);	10%	50%	13%	13%	13%	100%
	PETp (%)	15%	58%	14%	11%	2%	100%
Laveiras	PEQp (%)	17%	30%	13%	33%	7%	100%
	PETp (%)	13%	23%	23%	40%	0%	100%
Senhora da Rocha	PEQp (%)	17%	50%	17%	17%	0%	100%
	PETp (%)	17%	0%	33%	50%	0%	100%
Ponte Pinhal	PEQp (%)	23%	38%	15%	15%	8%	100%
	PETp (%)	7%	31%	21%	14%	27%	100%
Total	PEQp (%)	13%	<u>37%</u>	11%	<u>21%</u>	18%	100%
	PETp (%)	10%	<u>29%</u>	27%	<u>27%</u>	7%	100%

Legenda: TP - Polígonos de Thiessen.

Por fim, efetuou-se uma avaliação visual da evolução dos hidrogramas observados e simulados, visando confirmar ou validar a escolha do hidrograma unitário selecionado para simular o hidrograma observado. A título de exemplo, apresentam-se nas Figs. 5.4 a 5.8 os hidrogramas observados e os simulados recorrendo aos cinco hidrograma unitários, considerando os Polígonos de Thiessen, que produziram bons resultados na estatística de avaliação do ajustamento Nash-Sutcliffe (valores superiores a zero).

A qualidade das simulações obtidas, para além de terem dependido do tipo de hidrograma unitário utilizado, dependeram de diversos fatores que atuaram de forma independente ou correlacionada, como sejam:

- A adequabilidade da curva de vazão à gama de grandeza dos caudais simulados. Quando os hidrogramas simulados e observados estão próximos a curva de vazão está aparentemente válida. Contudo, por vezes, existem períodos temporais com caudais observados elevados e onde os caudais simulados se afastam dos observados, o que significará que a curva de vazão não estará a estimar corretamente os caudais associados a níveis hidrométricos mais elevados. A menor qualidade da curva de vazão associada a níveis hidrométricos maiores, deve-se, fundamentalmente, à falta de medição de caudais mais elevados, sendo mais crítica em secções com uma forma não regular. Assim, a extrapolação da curva de vazão para níveis hidrométricos relativamente altos conduz a desvios de caudal mais significativos entre os caudais observados e simulados. Este fator esteve presente, por exemplo, em muitos acontecimentos hidrometeorológicos associado à Senhora da Rocha.
- A caracterização fidedigna espaço temporal da precipitação sobre a bacia. A estimativa da precipitação poderá não representar a real precipitação média na área do acontecimento pluvioso, sendo que esta caracterização depende do método utilizado para a sua estimativa, estando a sua qualidade dependente, também, da origem sinóptica da precipitação. Assim, a existência de desvios na estimativa da precipitação associada à área da bacia hidrográfica poderá ter implicações relevantes no que concerne à simulação hidrológica, subestimando ou sobrestimando os hidrogramas simulados. Este fator está presente, por exemplo, em alguns acontecimentos hidrometeorológicos associado à Quinta das Camilas e Senhora da Rocha.

- A caracterização fidedigna espaço temporal da precipitação, sobre a bacia simulada, a partir da informação calibrada do radar meteorológico. Esta calibração necessita, ainda, do aperfeiçoamento contínuo que permitirá melhorar os resultados nas estimativas dos hidrogramas, uma vez que possibilita incorporar a precipitação não medida a partir da informação recolhida nos udógrafos, incluindo automaticamente a variabilidade espacial associada à origem sinótica da precipitação (Fig. 5.6).
- A simulação da evolução dos caudais depende das variáveis hidrológicas que caracterizam as condições iniciais e o escoamento de base da bacia hidrográfica. Os valores considerados foram obtidos a partir das médias dos hidrogramas observados analisados, que poderão ser muito diferentes de alguns dos períodos simulados. Este fator está presente em diversos acontecimentos hidrometeorológicos associado à Quinta da Camilas.
- A dificuldade de simular hidrogramas de cheia com pontas múltiplas. A metodologia e os hidrogramas unitários utilizados têm maior dificuldade em reproduzir hidrogramas com picos múltiplos (observados num espaço de tempo curto) é frequente que o hidrograma simulado apresente caudais e tempos para a ponta desfasados dos observados. Este fator está presente em alguns acontecimentos hidrometeorológicos associado às Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.
- Os modelos disponíveis no programa foram desenvolvidos com base em limites para a sua aplicação, pelo que a sua não verificação poderá conduzir a resultados não satisfatórios. Neste âmbito, está incluída a aplicação a bacias hidrográficas com a dimensão superior ou inferior ao recomendado, a discretização temporal dos dados de entrada do modelo não adequada (intervalo horário), aspetos referidos no capítulo 4, e a utilização do hidrograma unitário SCS para simular hidrogramas com picos múltiplos.
- Na determinação dos hidrogramas unitários o escoamento de base obteve-se conforme apresentado na alínea 4.1.1. (Fig. 4.2), enquanto na simulação dos acontecimentos hidrometeorológico é utilizado o modelo exponencial indicado no subcapítulo 5.2 (Fig. 5.1).

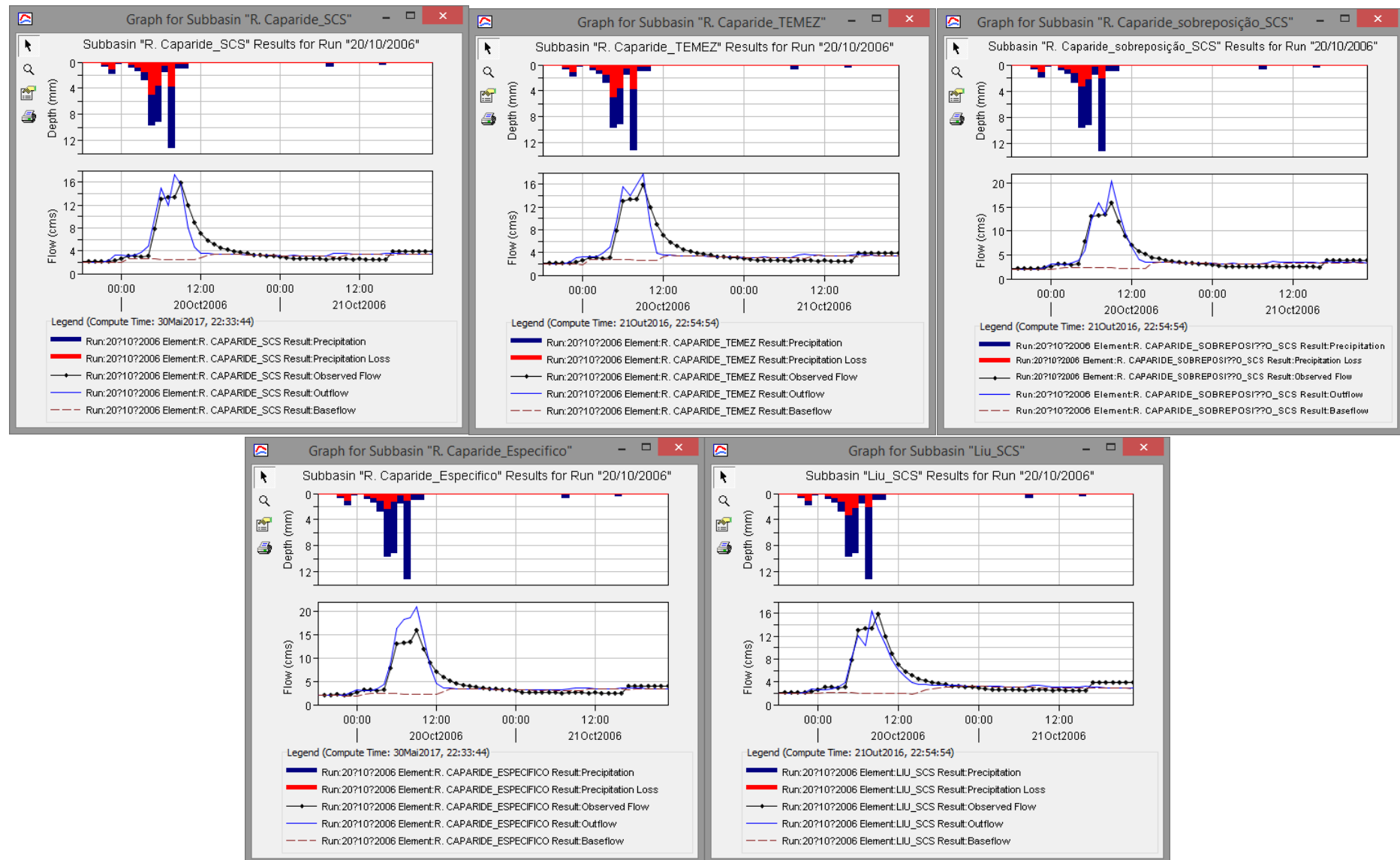


Figura 5.4 – Exemplos de hidrogramas observados e simulados obtidos através da aplicação dos hidrogramas unitários estimados e da precipitação estimada a partir dos Polígonos de Thiessen, com bons resultados no parâmetro de avaliação do ajustamento Nash-Sutcliffe, associada à bacia hidrográfica definida na estação hidrométrica de Quinta das Camilas.

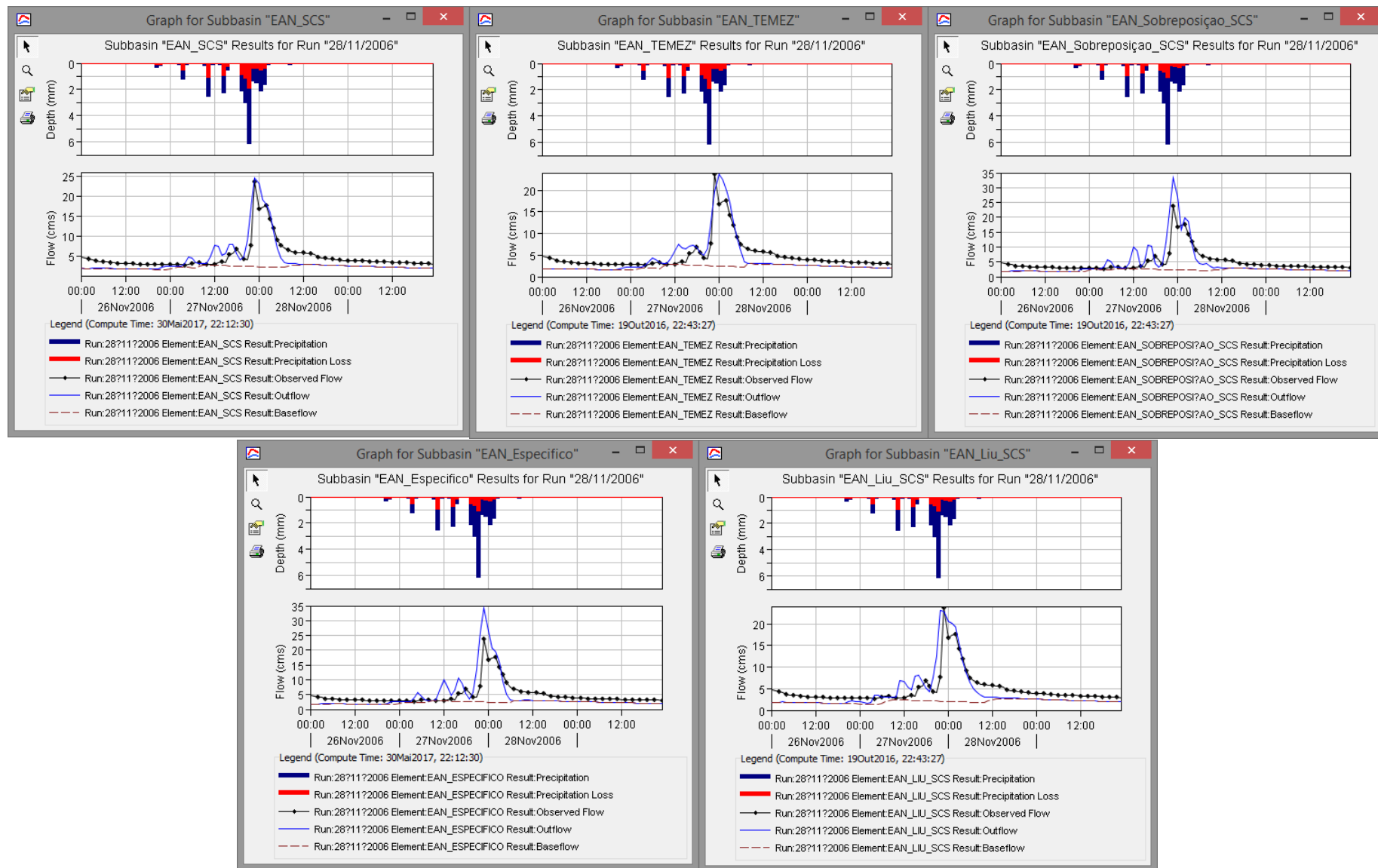


Figura 5.5 – Exemplos de hidrogramas observados e simulados obtidos através da aplicação dos hidrogramas unitários estimados e da precipitação estimada a partir dos Polígonos de Thiessen, com bons resultados no parâmetro de avaliação do ajustamento Nash-Sutcliffe, associada à bacia hidrográfica definida na estação hidrométrica da Estação Agronômica Nacional.

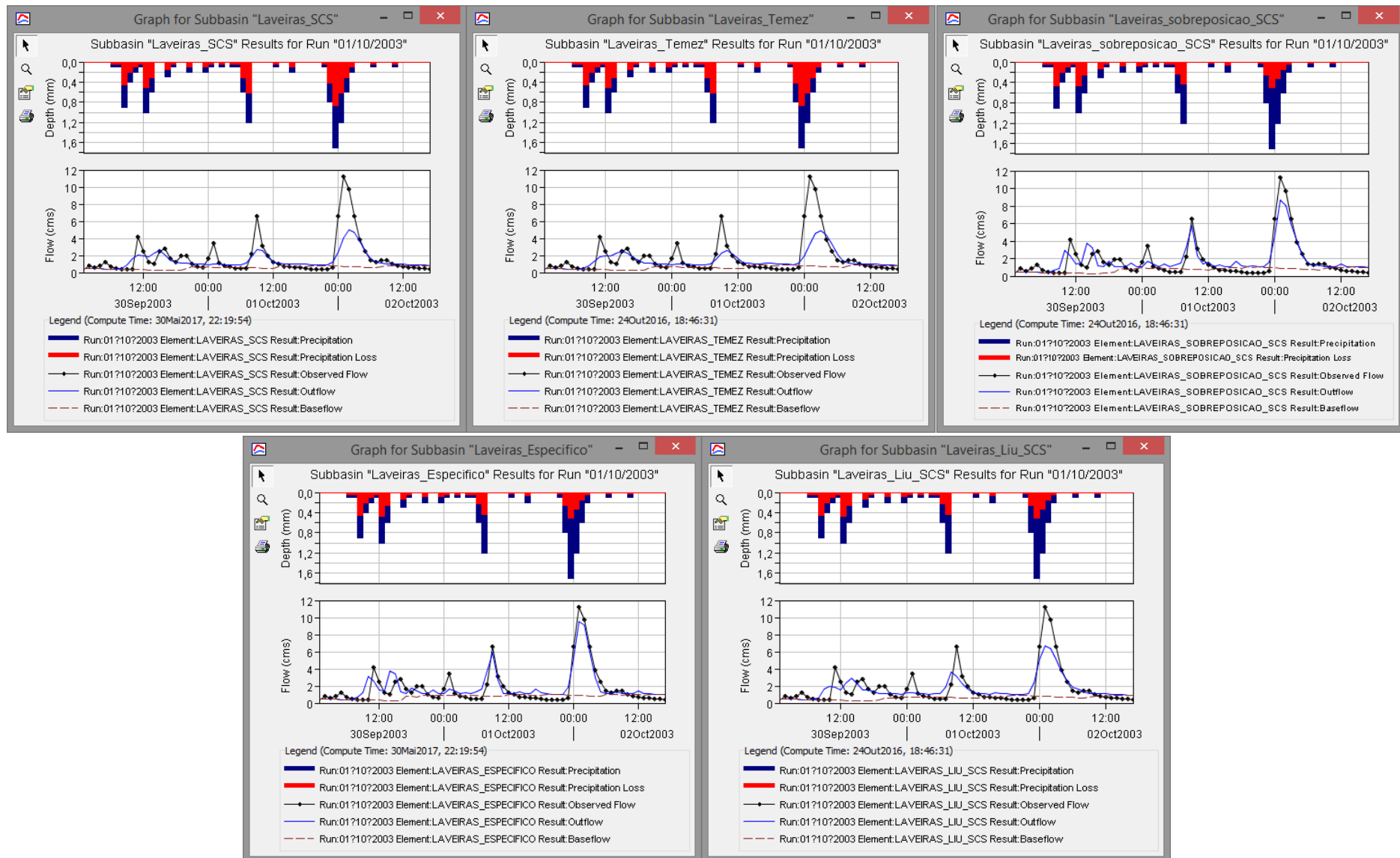


Figura 5.6 – Exemplos de hidrogramas observados e simulados obtidos através da aplicação dos hidrogramas unitários estimados e da precipitação estimada a partir dos Polígonos de Thiessen, com bons resultados no parâmetro de avaliação do ajustamento Nash-Sutcliffe, associada à bacia hidrográfica definida na estação hidrométrica de Laveiras.

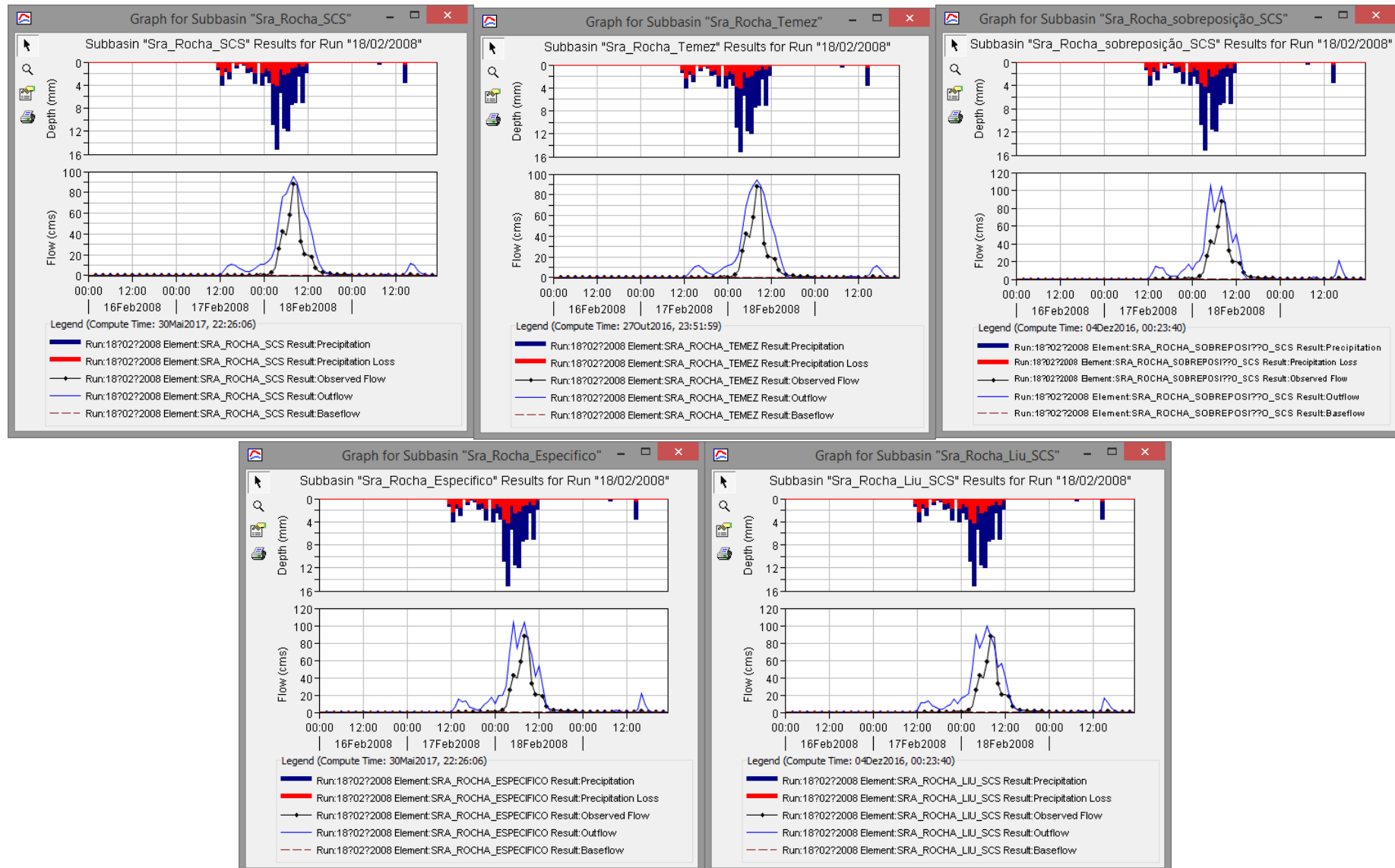


Figura 5.7 – Exemplos de hidrogramas observados e simulados obtidos através da aplicação dos hidrogramas unitários estimados e da precipitação estimada a partir dos Polígonos de Thiessen, com bons resultados no parâmetro de avaliação do ajustamento Nash-Sutcliffe, associada à bacia hidrográfica definida na estação hidrométrica de Senhora da Rocha.

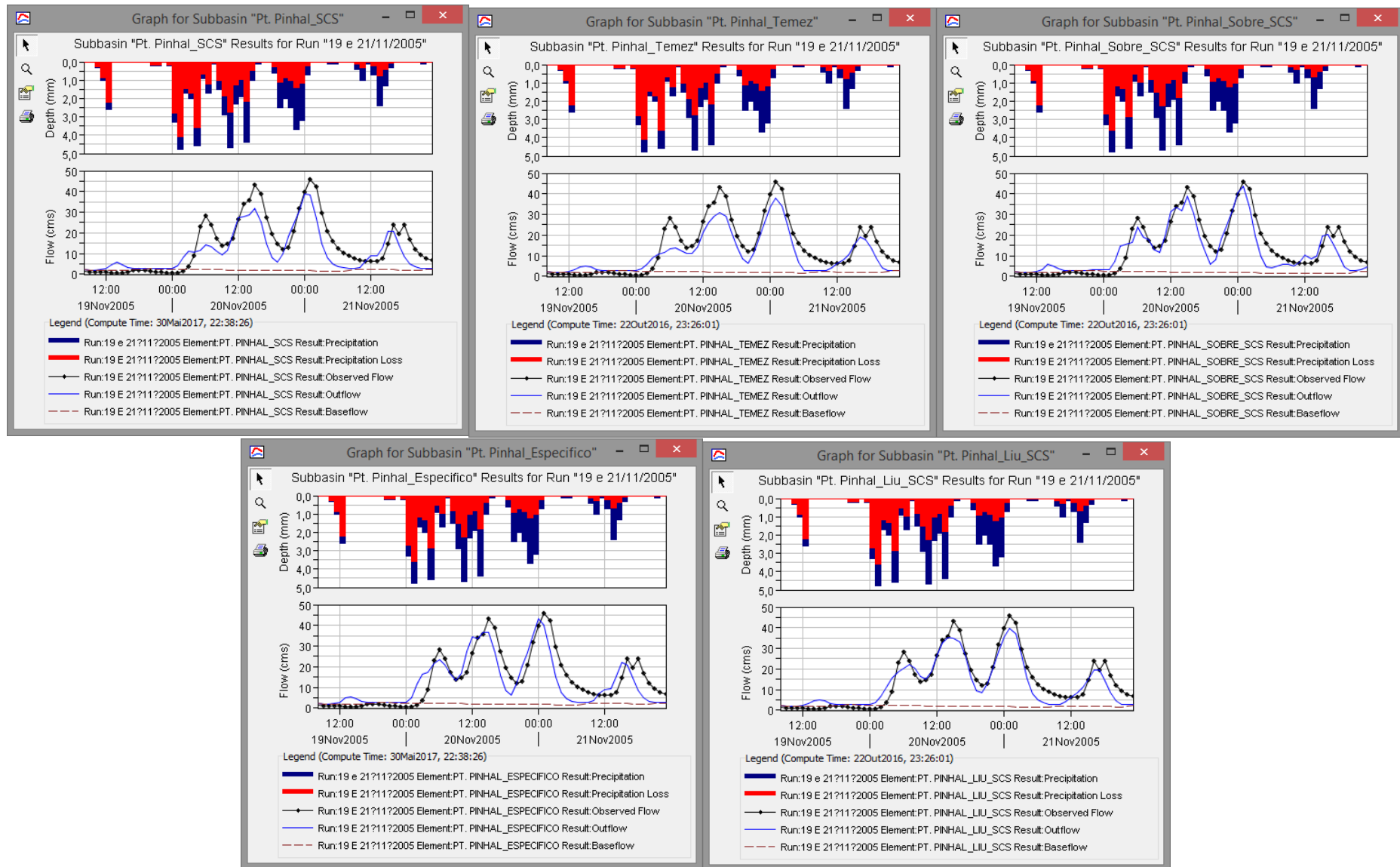


Figura 5.8 – Exemplos de hidrogramas observados e simulados obtidos através da aplicação dos hidrogramas unitários estimados e da precipitação estimada a partir dos Polígonos de Thiessen, com bons resultados no parâmetro de avaliação do ajustamento Nash-Sutcliffe, associada à bacia hidrográfica definida na estação hidrométrica de Ponte Pinhal.

A análise efetuada, considerando os treze acontecimentos hidrometeorológicos simulados com dados de radar meteorológico, também evidencia que os melhores resultados são obtidos na simulação resultante da utilização dos hidrogramas unitários de Temez, independentemente do tipo de calibração do radar. Este hidrograma unitário é, também, o que melhores resultados obtém nas estatísticas da avaliação do ajustamento associados ao caudal de ponta (Quadro 5.9 a 5.12). Os valores totais das estatísticas correspondem ao número de vezes que um determinado hidrograma unitário foi selecionado, para cada estatística de avaliação, em relação aos 13 períodos simulados.

Quadro 5.9 – Resultados das estatísticas da avaliação da simulação dos hidrogramas observados a partir dos cinco hidrogramas unitários estimados, com caracterização espacial de precipitação obtida pelo radar calibrado com os Polígonos de Thiessen, para as bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal (SR, MRA, SQR e NS).

Distribuição espacial segundo Radar Calibrado com TP	Estatísticas	Hidrogramas unitários					Total de acontecimentos simulados
		SCS	Temez	Observado	Específico	Clark (Liu, et al., 2003)	
Quinta das Camilas	SR (mm)	0%	0%	0%	75%	25%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0%	0%	25%	50%	25%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0%	0%	25%	50%	25%	100%
	NS (-)	0%	0%	25%	50%	25%	100%
Estação Agronómica Nacional	SR (mm)	33%	33%	33%	0%	0%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	33%	67%	0%	0%	0%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	33%	67%	0%	0%	0%	100%
	NS (-)	33%	67%	0%	0%	0%	100%
Laveiras	SR (mm)	0%	50%	0%	50%	0%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	50%	50%	0%	0%	0%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	50%	50%	0%	0%	0%	100%
	NS (-)	50%	50%	0%	0%	0%	100%
Senhora da Rocha	SR (mm)	0%	100%	0%	0%	0%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0%	100%	0%	0%	0%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	50%	50%	0%	0%	0%	100%
	NS (-)	50%	50%	0%	0%	0%	100%
Ponte Pinhal	SR (mm)	0%	50%	0%	50%	0%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0%	50%	50%	0%	0%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0%	50%	50%	0%	0%	100%
	NS (-)	0%	50%	50%	0%	0%	100%
Total	SR (mm)	8%	<u>38%</u>	8%	38%	8%	100%
	MRA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	15%	<u>46%</u>	15%	15%	8%	100%
	SQR ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	23%	<u>38%</u>	15%	15%	8%	100%
	NS (-)	23%	<u>38%</u>	15%	15%	8%	100%

Legenda: TP - Polígonos de Thiessen.

Quadro 5.10 – Resultados das estatísticas da avaliação da simulação dos hidrogramas observados a partir dos cinco hidrogramas unitários estimados, com caracterização espacial de precipitação obtida pelo radar calibrado com os Polígonos de Thiessen, para as bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal (PEQ_p e PET_p).

Distribuição espacial segundo Radar Calibrado com TP	Hidrogramas unitários	Hidrogramas unitários					Total de acontecimentos simulados
		SCS	Temez	Observado	Específico	Clark (Liu, et al., 2003)	
Quinta das Camilas	PEQ _p (%)	0%	0%	0%	75%	25%	100%
	PET _p (%)	0%	8%	83%	8%	0%	100%
Estação Agronómica Nacional	PEQ _p (%)	0%	33%	0%	0%	67%	100%
	PET _p (%)	0%	100%	0%	0%	0%	100%
Laveiras	PEQ _p (%)	0%	50%	50%	0%	0%	100%
	PET _p (%)	50%	0%	0%	50%	0%	100%
Senhora da Rocha	PEQ _p (%)	0%	50%	0%	0%	50%	100%
	PET _p (%)	33%	0%	33%	33%	0%	100%
Ponte Pinhal	PEQ _p (%)	0%	50%	50%	0%	0%	100%
	PET _p (%)	0%	100%	0%	0%	0%	100%
Total	PEQ _p (%)	0%	<u>31%</u>	15%	23%	31%	100%
	PET _p (%)	13%	<u>41%</u>	31%	15%	0%	100%

Legenda: TP - Polígonos de Thiessen.

Quadro 5.11 – Resultados das estatísticas da avaliação da simulação dos hidrogramas observados a partir dos cinco hidrogramas unitários estimados, com caracterização espacial de precipitação obtida pelo radar calibrado com *Inverse Distance Weighted*, para as bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal (SR, MRA, SQR e NS).

Distribuição espacial segundo Radar Calibrado com IDW	Estatísticas	Hidrogramas unitários					Total de acontecimentos simulados
		SCS	Temez	Observado	Específico	Clark (Liu, et al., 2003)	
Quinta das Camilas	SR (mm)	0%	0%	0%	75%	25%	100%
	MRA (m ³ s ⁻¹)	0%	0%	0%	75%	25%	100%
	SQR (m ³ s ⁻¹)	0%	0%	0%	75%	25%	100%
	NS (-)	0%	0%	0%	75%	25%	100%
EAN	SR (mm)	33%	33%	33%	0%	0%	100%
	MRA (m ³ s ⁻¹)	33%	67%	0%	0%	0%	100%
	SQR (m ³ s ⁻¹)	33%	67%	0%	0%	0%	100%
	NS (-)	33%	67%	0%	0%	0%	100%
Laveiras	SR (mm)	50%	0%	0%	0%	50%	100%
	MRA (m ³ s ⁻¹)	50%	50%	0%	0%	0%	100%
	SQR (m ³ s ⁻¹)	50%	50%	0%	0%	0%	100%
	NS (-)	50%	50%	0%	0%	0%	100%
Senhora da Rocha	SR (mm)	0%	100%	0%	0%	0%	100%
	MRA (m ³ s ⁻¹)	0%	100%	0%	0%	0%	100%
	SQR (m ³ s ⁻¹)	100%	0%	0%	0%	0%	100%
	NS (-)	100%	0%	0%	0%	0%	100%
Ponte Pinhal	SR (mm)	0%	50%	0%	50%	0%	100%
	MRA (m ³ s ⁻¹)	0%	50%	50%	0%	0%	100%
	SQR (m ³ s ⁻¹)	0%	50%	50%	0%	0%	100%
	NS (-)	0%	50%	50%	0%	0%	100%
Total	SR (mm)	15%	<u>31%</u>	8%	31%	15%	100%
	MRA (m ³ s ⁻¹)	15%	<u>46%</u>	8%	23%	8%	100%
	SQR (m ³ s ⁻¹)	31%	<u>31%</u>	8%	23%	8%	100%
	NS (-)	31%	<u>31%</u>	8%	23%	8%	100%

Legenda: IDW2-6 - Inverse Distance Weighted.

Quadro 5.12 – Resultados das estatísticas da avaliação da simulação dos hidrogramas observados a partir dos cinco hidrogramas unitários estimados, com caracterização espacial de precipitação obtida pelo radar calibrado com *Inverse Distance Weighted*, para as bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal (PEQ_p e PET_p).

Distribuição espacial segundo Radar Calibrado com IDW	Estatísticas	Hidrogramas unitários					Total de acontecimentos simulados
		SCS	Temez	Observado	Específico	Clark (Liu, et al., 2003)	
Quinta das Camilas	PEQp (%)	0%	0%	0%	75%	25%	100%
	PETp (%)	0%	8%	71%	21%	0%	100%
Estação Agronómica Nacional	PEQp (%)	0%	67%	0%	0%	33%	100%
	PETp (%)	0%	100%	0%	0%	0%	100%
Laveiras	PEQp (%)	50%	0%	50%	0%	0%	100%
	PETp (%)	0%	0%	25%	75%	0%	100%
Senhora da Rocha	PEQp (%)	0%	100%	0%	0%	0%	100%
	PETp (%)	17%	0%	42%	42%	0%	100%
Ponte Pinhal	PEQp (%)	0%	50%	50%	0%	0%	100%
	PETp (%)	0%	100%	0%	0%	0%	100%
Total	PEQp (%)	8%	<u>38%</u>	15%	23%	15%	100%
	PETp (%)	3%	<u>41%</u>	32%	24%	0%	100%

Legenda: IDW2-6 - Inverse Distance Weighted.

Os resultados associados à simulação hidrológica com os hidrogramas unitários Específicos, definidos na alínea 4.1.3.7., são bastante interessantes, uma vez que foram selecionados em diversas ocasiões como aqueles a partir dos quais se obtêm melhores resultados (Quadro 5.7 a 5.12), principalmente quando se considera que o importante é prever com maior precisão os caudais de ponta máximos.

Com o objetivo de quantificar a forma como o radar meteorológico contribui para a melhoria da qualidade das simulações foram avaliados os valores obtidos nas seis estatísticas, considerando a precipitação ponderada obtida pelos Polígonos de Thiessen, calibrada pelo radar com TP ou IDW (Quadro 5.13). Esta avaliação considerou a média dos resultados de cada uma das seis estatísticas de avaliação do ajustamento, entre os caudais observados e simulados, de todos os períodos simulados com informação do radar meteorológico, isto é, correspondente aos 13 acontecimentos hidrometeorológicos. Esta avaliação incluiu, também, a determinação da média dos resultados de cada estatística de avaliação do ajustamento associados aos hidrogramas unitários com os melhores resultados. Em ambas as avaliações foi possível verificar melhorias na qualidade da simulação dos hidrogramas e dos caudais de ponta quando se recorreu à precipitação obtida, respetivamente, pelo radar calibrado com Polígonos de Thiessen e os Polígonos de Thiessen.

Quadro 5.13 – Resultados das estatísticas de avaliação do ajustamento, considerando a precipitação ponderada obtida pelos Polígonos de Thiessen, calibração do radar com TP e IDW, para as cinco bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.

Estatísticas	Média dos vários hidrogramas considerando os 13 acontecimentos hidrometeorológicos			Média dos melhores hidrogramas considerando os 13 acontecimentos hidrometeorológicos		
	TP	RC _{TP}	RC _{IDW}	TP	RC _{TP}	RC _{IDW}
SR (mm)	6,92	<u>-0,77</u>	2,43	5,68	<u>-0,50</u>	2,57
MRA (m ³ s ⁻¹)	2,88	<u>2,82</u>	3,06	2,46	<u>2,40</u>	2,57
SQR (m ³ s ⁻¹)	4416,91	<u>2743,88</u>	3018,40	3128,76	<u>1727,66</u>	1728,11
NS	<u>-0,53</u>	-1,19	-2,57	<u>-0,16</u>	-0,50	-1,45
PEQp (%)	55,88	<u>55,03</u>	67,62	34,16	<u>26,77</u>	35,23
PETp (%)	<u>2,44</u>	2,86	2,78	0,59	<u>0,52</u>	0,59

Nas Figs. 5.9 a 5.13 apresentam-se exemplos de períodos simulados nas cinco bacias hidrográficas recorrendo aos hidrogramas unitários com melhores resultados nas estatísticas de ajustamento entre os valores simulados e observados (Temez e Específicos), associados às três distribuições espaciais de precipitação mencionado anteriormente. Nestes exemplos é possível constatar visualmente que os hidrogramas unitários com melhores resultados ocorre quando é utilizada a distribuição espacial de precipitação obtida a partir dos Polígonos de Thiessen e da informação do radar calibrada com os Polígonos de Thiessen. Esta conclusão corrobora com os valores dos parâmetros indicados no Quadro 5.13.

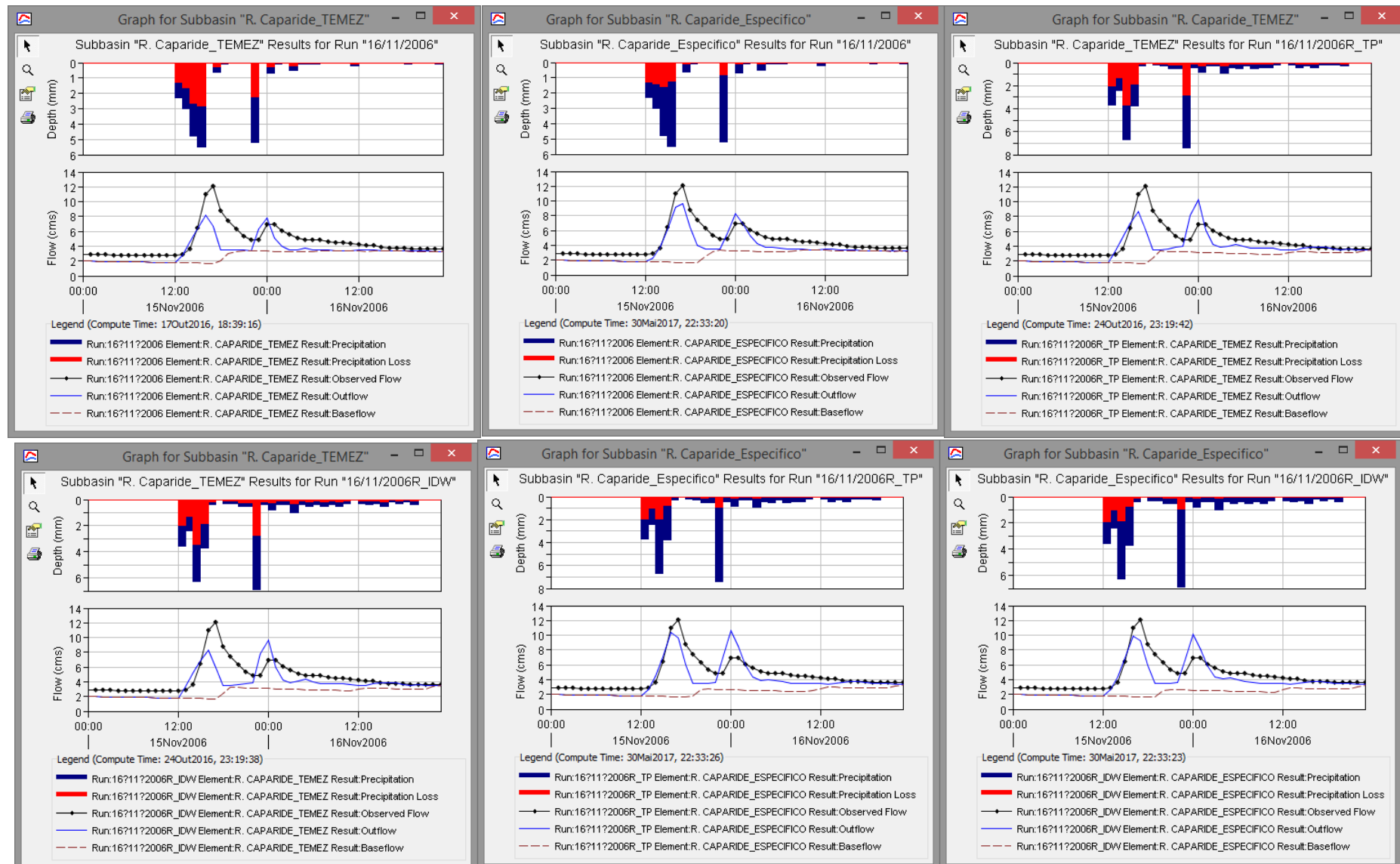


Figura 5.9 – Exemplos de hidrogramas observados e simulados obtidos através da aplicação dos hidrogramas unitários e da precipitação estimada a partir dos Polígonos de Thiessen e do radar meteorológico calibrado (R_TP e R_IDW), com bons resultados nos parâmetros de avaliação do ajustamento, associada à bacia hidrográfica definida na estação hidrométrica de Quinta das Camilas.

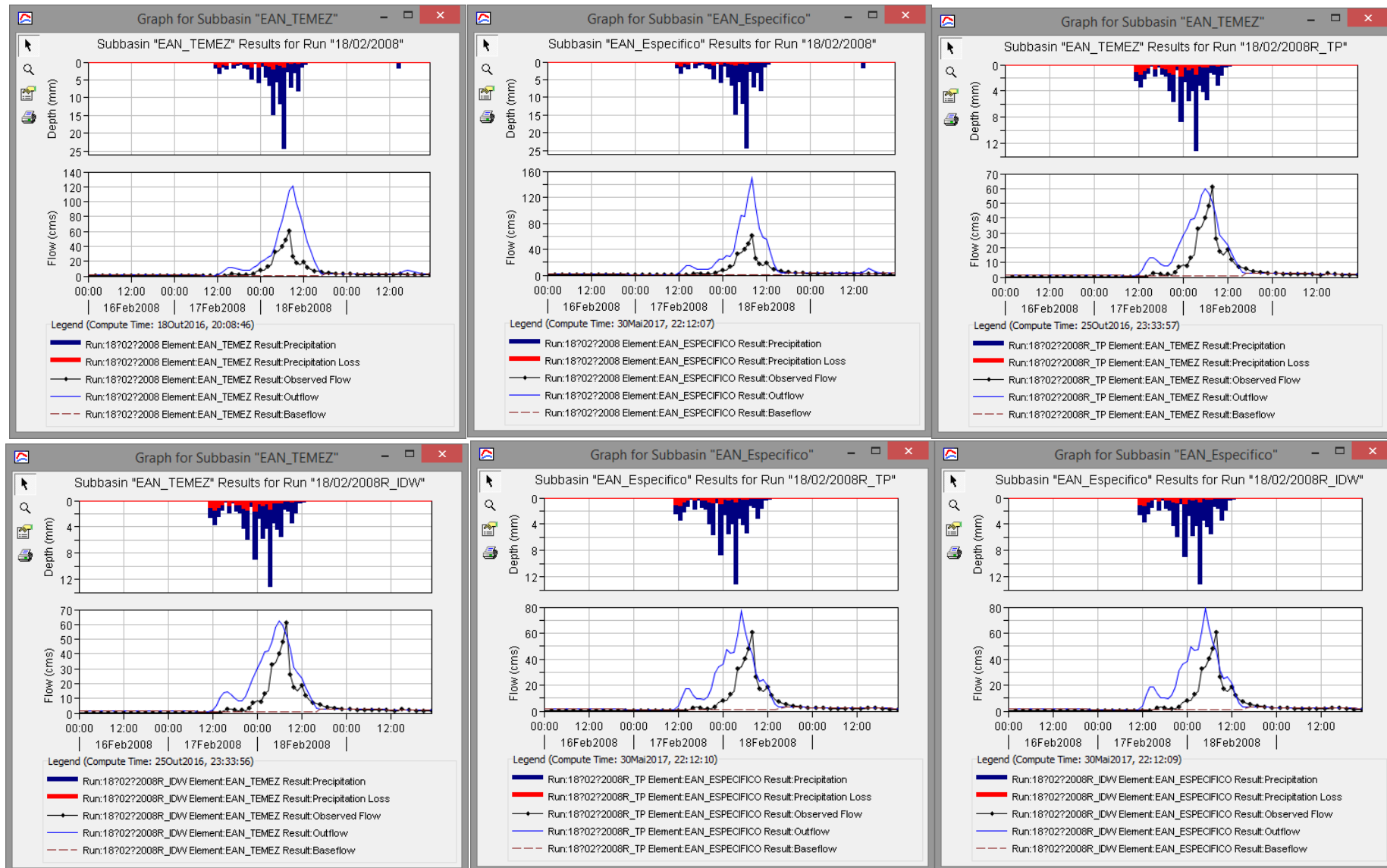


Figura 5.10 – Exemplos de hidrogramas observados e simulados obtidos através da aplicação dos hidrogramas unitários e da precipitação estimada a partir dos Polígonos de Thiessen e do radar meteorológico calibrado (R_TP e R_IDW), com bons resultados nos parâmetros de avaliação do ajustamento, associada à bacia hidrográfica definida na estação hidrométrica da Estação Agronômica Nacional.

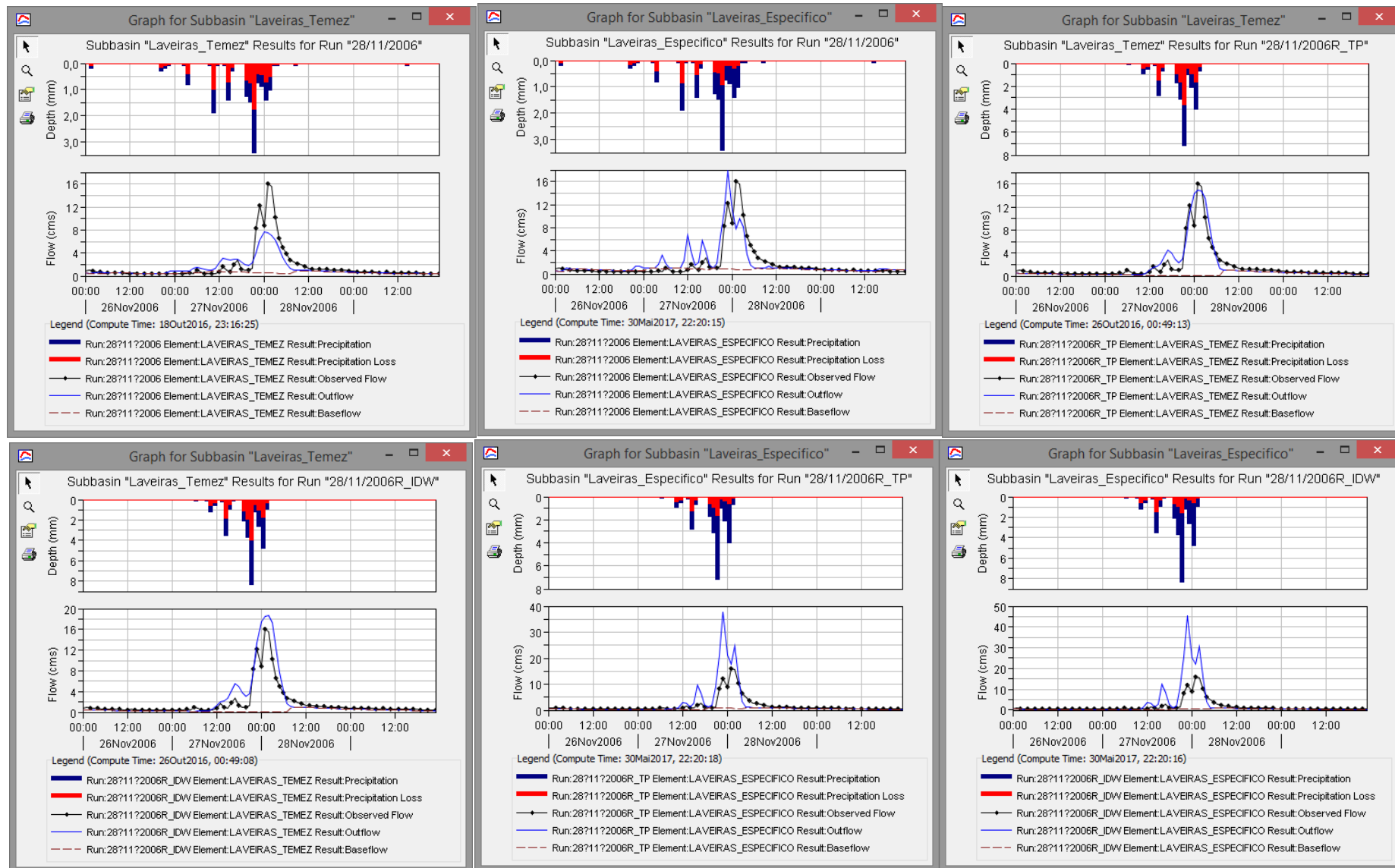


Figura 5.11 – Exemplos de hidrogramas observados e simulados obtidos através da aplicação dos hidrogramas unitários e da precipitação estimada a partir dos Polígonos de Thiessen e do radar meteorológico calibrado (R_TP e R_IDW), com bons resultados nos parâmetros de avaliação do ajustamento, associada à bacia hidrográfica definida na estação hidrométrica de Laveiras.

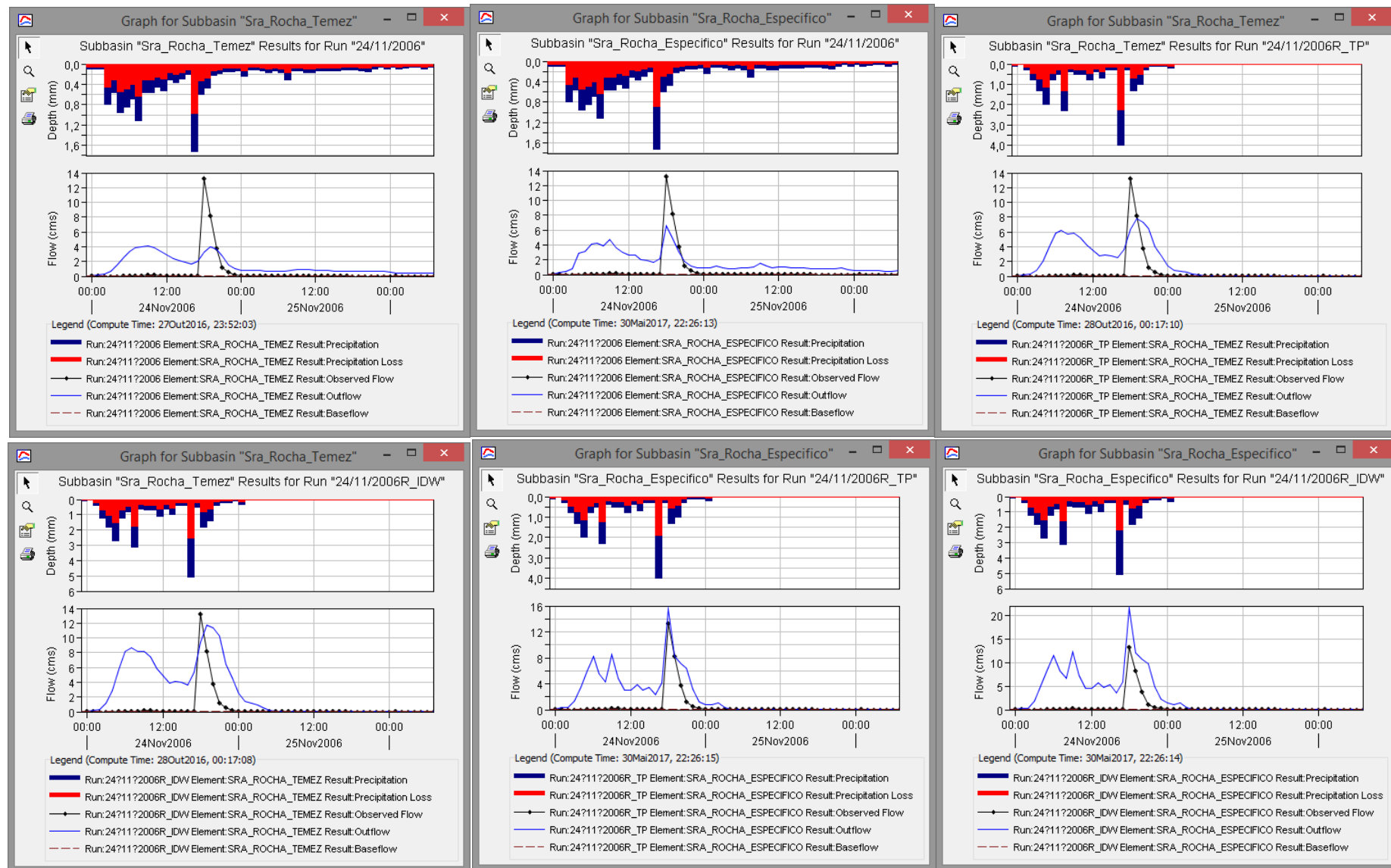


Figura 5.12 – Exemplos de hidrogramas observados e simulados obtidos através da aplicação dos hidrogramas unitários e da precipitação estimada a partir dos Polígonos de Thiessen e do radar meteorológico calibrado (R_TP e R_IDW), com bons resultados nos parâmetros de avaliação do ajustamento, associada à bacia hidrográfica definida na estação hidrométrica de Senhora da Rocha.

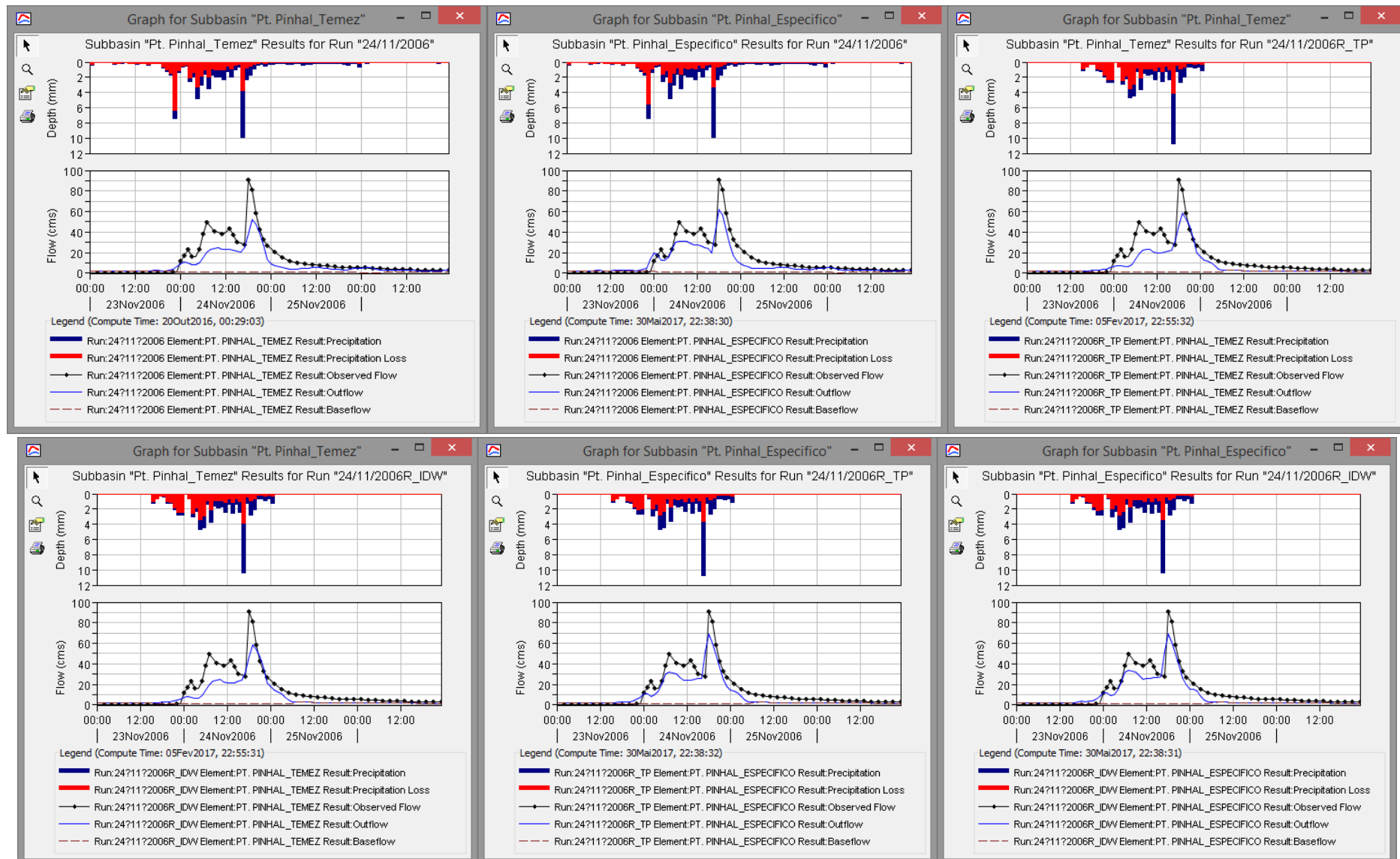


Figura 5.13 – Exemplos de hidrogramas observados e simulados obtidos através da aplicação dos hidrogramas unitários e da precipitação estimada a partir dos Polígonos de Thiessen e do radar meteorológico calibrado (R_TP e R_IDW), com bons resultados nos parâmetros de avaliação do ajustamento, associada à bacia hidrográfica definida na estação hidrométrica de Ponte Pinhal.

5.5. Resultados hidrológicos da simulação dos acontecimentos hidrometeorológicos

A simulação de 62 períodos temporais (que correspondem a 68 acontecimentos hidrometeorológicos) associados às cinco bacias hidrográficas, permite obter a estimativa de caudais de ponta de cheia, aos quais se poderem associar diferentes períodos de retorno. Os parâmetros utilizados nas simulações com melhores estatísticas de avaliação podem ser utilizados para estimar os caudais ocorridos no passado e na avaliação da excecionalidade dos caudais de cheia e, como tal, fornecer informação hidrométrica para os estudos hidrológicos de suporte ao dimensionamento de infraestruturas de obras hidráulicas, integrando valores na série dos caudais máximos instantâneos anuais. Por outro lado, a estimativa dos caudais pode ser utilizada para justificar os prejuízos ocorridos em períodos passados, devido a inundações provocadas por esta magnitude de caudal.

No Quadro 5.14 apresentam-se, a título de exemplo e por serem os mais relevantes para o aviso das cheias e para o dimensionamento hidráulico, os caudais de ponta observados e resultantes da simulação de acontecimentos pluviosos para as bacias hidrográficas analisadas. Os caudais simulados foram selecionados considerando a distribuição espacial da precipitação segundo os Polígonos de Thiessen e os melhores dos parâmetros de avaliação do ajustamento entre os hidrogramas observados e simulados (subcapítulo 5.4): hidrogramas unitários de Temez e Específico.

Quadro 5.14 – Caudais de ponta observados e simulados, nas bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Zambujal, Ponte Pinhal e Colares (continua).

Acontecimentos hidrometeorológicos	Hidrograma	Estação hidrométrica SNIRH				
		Quinta das Camilas	Estação Agronómica Nacional	Laveiras	Senhora da Rocha	Ponte Pinhal
		Caudais (m³ s⁻¹)				
18/fev/08	Observado	4,2	60,9	101,2	87,9	103,9
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	12,5	120,4	104,5	94,1	144,2
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	13,8	149,3	166,5	103,9	152,5
16/nov/06	Observado	12,1	20,3	10,7	-	21,4
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	8,1	28,1	13,9	-	29,9
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	9,7	37,8	28,8	-	47,6
24/nov/06	Observado	18,7	32,0	23,4	13,2	90,5
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	17,1	29,9	9,0	4,2	51,9
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	15,8	43,1	23,8	6,5	61,8
27-28/nov/2006	Observado	12,5	23,7	16,1	6,4	28,8
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	10,5	23,7	7,7	3,0	8,6
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	12,0	34,3	17,8	4,2	15,5
16/out/06	Observado	3,7	11,2	3,8	-	-
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	7,8	14,1	7,3	-	-
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	8,3	19,4	13,2	-	-
18/out/06	Observado	6,3	20,2	6,1	-	-
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	9,9	15,0	7,4	-	-
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	10,9	21,7	17,8	-	-
20/out/06	Observado	15,9	30,8	16,1	3,5	14,8
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	17,8	45,7	21,7	15,3	56,6
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	20,9	58,7	43,5	22,3	71,1
22-23/10/2006	Observado	26,2	34,6	22,1	7,9	10,9
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	27,0	37,8	16,6	17,5	43,4
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	25,3	55,1	39,2	29,9	55,5

Legenda: (-) – Acontecimento hidrometeorológico não selecionado no capítulo 4 para obtenção dos hidrogramas unitários observados e, por isso, não modelado hidrológicamente.

Quadro 5.14 – Caudais de ponta observados e simulados, nas bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Zambujal, Ponte Pinhal e Colares (continuação).

Acontecimentos hidrometeorológicos	Hidrograma	Estação hidrométrica SNIRH				
		Quinta das Camilas	Estação Agronómica Nacional	Laveiras	Senhora da Rocha	Ponte Pinhal
		Caudais (m³ s⁻¹)				
25/out/06	Observado	13,8	14,9	23,4	2,8	54,6
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	9,4	30,9	8,9	14,3	63,8
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	9,3	43,5	14,7	20,7	75,1
26/out/06	Observado	9,8	12,9	5,7	-	21,8
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	6,0	13,3	7,2	-	11,8
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	6,6	17,4	14,3	-	21,0
03/nov/05	Observado	2,7	22,4	-	-	15,8
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	9,1	23,6	-	-	22,6
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	10,4	33,7	-	-	38,0
19-21/11/2005	Observado	5,3	-	-	-	45,6
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	21,6	-	-	-	37,9
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	23,5	-	-	-	43,0
1-2/10/2003	Observado	-	10,8	11,2	-	-
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	-	6,7	4,9	-	-
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	-	8,6	9,6	-	-
12/out/03	Observado	-	7,7	7,9	-	-
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	-	5,1	3,9	-	-
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	-	6,0	6,1	-	-
25/out/03	Observado	3,7	-	23,4	-	12,7
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	8,7	-	8,9	-	19,8
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	11,4	-	14,7	-	34,5
27/out/03	Observado	-	6,8	10,7	-	5,5
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	-	9,9	5,0	-	5,1
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	-	12,7	11,8	-	8,6
31/out/03	Observado	-	18,9	19,6	-	13,2
	Simulado pelo hidrograma unitário Temez	-	11,0	7,5	-	11,9
	Simulado pelo hidrograma unitário Específico	-	14,0	14,3	-	17,6

Legenda: (-) – Acontecimento hidrometeorológico não selecionado no capítulo 4 para obtenção dos hidrogramas unitários observados e, por isso, não modelado hidrológicamente.

Na Fig. 5.14 representam-se os caudais simulados e observados nas cinco bacias hidrográficas, onde é possível verificar uma razoável correspondência, uma vez que o valor do coeficiente de determinação obtido é superior a 0,70, o que significa que a variável dependente (caudal) é explicada em mais de 70 %, sendo que o melhor resultado está associado ao hidrograma unitário de Temez.

Para se avaliarem as diferenças entre os resultados de simulação usando ambos hidrogramas unitários sintéticos de Temez e Específico, apresentam-se no Quadro 5.15 os valores obtidos para a estatística de ajustamento associada ao tempo para a ponta, PET_p, para a totalidade dos acontecimentos hidrometeorológicos simulados e as cinco bacias hidrográficas, que dispõem de dados de escoamento. Pode-se constatar que a média dos valores observados da estatística é de 3,03 %, com desvio padrão médio de 3,56 %, considerando o hidrograma unitário de Temez, e é de 2,06 %, com desvio-padrão médio de 2,30 %, no caso do hidrograma unitário Específico. A análise dos coeficientes de variação permite verificar uma ligeira redução com a aplicação do hidrograma unitário Específico, estando em comparação valores de coeficiente de variação elevados.

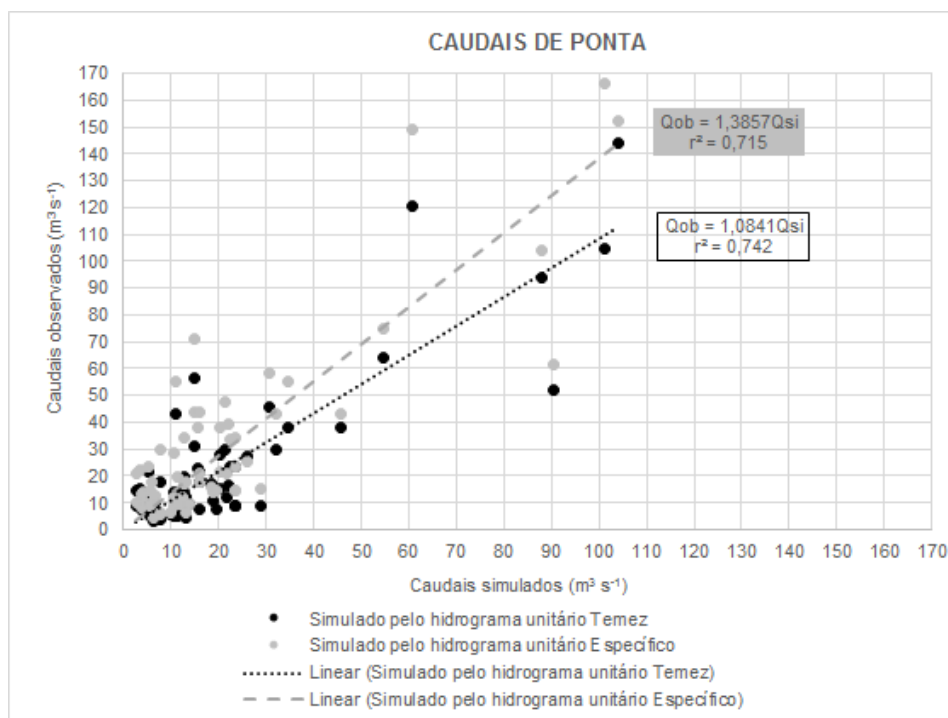


Figura 5.14 – Relações entre os caudais observados e os simulados recorrendo aos hidrogramas unitários de Temez e Específico.

Quadro 5.15 – Descritores estatísticos da estatística de avaliação do ajustamento PETp, associados às bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.

Descritores estatísticos dos parâmetros de avaliação de ajustamento PETp	Estação hidrométrica SNIRH					Média Total	Coeficiente de variação Total
	Quinta das Camilas	Estação Agronómica Nacional	Laveiras	Senhora da Rocha	Ponte Pinhal		
	(%)						
Média PETp (HU Temez)	4,12	2,03	3,65	3,08	2,29	3,03	1,17
Desvio-Padrão PETp (HU Temez)	6,84	1,78	5,06	2,04	2,06	3,56	
Média PETp (HU Especifico)	1,42	3,30	1,58	1,12	2,88	2,06	1,12
Desvio-Padrão PETp (HU Especifico)	2,27	3,12	1,91	1,73	2,43	2,30	

Legenda: HU – Hidrograma unitário.

No Quadro 5.16 apresentam-se os caudais máximos instantâneos simulados através dos hidrogramas unitários sintéticos (alínea 4.1.3.7.), para os anos 2008, 2006, 2005 e 2003, associados às estações hidrométricas de Ponte Zambujal, que não tem série histórica, e de Colares, cujo registo hidrométrico não permite estimar os caudais. As perdas consideradas estão associadas à utilização dos hidrogramas unitários de SCS e de Temez (Quadro 5.4). Estes caudais de ponta resultam da modelação hidrológica com os eventos pluviosos com maiores precipitações no período temporal simulado, através da aplicação dos hidrogramas unitários sintéticos para a região e de Temez (capítulo 4), determinados a partir das características fisiográficas das bacias (capítulo 2). Deste modo, comparam-se os caudais de ponta máximos obtidos mediante a aplicação do hidrograma unitário de Temez, hidrograma com os melhores resultados nas estatísticas de avaliação do ajustamento, com os caudais de ponta máximos obtidos através da utilização dos hidrogramas unitários sintético aplicável à região.

Quadro 5.16 – Caudais máximos instantâneos simulados para os anos hidrológicos 2007/08, 2006/07, 2005/06 e 2003/04, associados às bacias hidrográficas definidas nas estações hidrométricas de Ponte Zambujal e de Colares.

Acontecimentos hidrometeorológicos	Estação hidrométrica SNIRH			
	Ponte Zambujal		Colares	
	Caudal de ponta (m³ s⁻¹)			
	HU sintético de Temez	HU Sintético para a região	HU sintético de Temez	HU Sintético para a região
18/fev/08	106,9	123,0	15,5	15,8
24/nov/06	84,5	114,5	17,0	17,4
19-21/nov/2005	33,4	42,0	24,0	25,8
1-2/out/2003	41,7	58,8	-	-
25/out/03	-	-	10,3	10,4

5.6. Propostas de melhoria do Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH)

A Autoridade Nacional da Água é a responsável pelo Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH), que envolve várias atividades, como sejam a monitorização contínua de variáveis hidrometeorológicas e a modelação hidrológica visando a previsão de caudais de ponta e respetivos tempos, assegurando a disponibilização dos dados e da informação em tempo real para apoio à atividade de gestão dos eventos de cheia e à decisão das atividades no âmbito da proteção civil. Deste modo, é possível que todos os intervenientes tenham os mesmos dados no mesmo momento temporal. O funcionamento pleno deste sistema permite diminuir a vulnerabilidade do território face aos eventos de cheia, uma vez que permite a salvaguarda da sociedade, isto é, dum conjunto de infraestruturas (e.g., rede viária), de serviços e da população potencialmente afetada.

O SVARH é um subsistema do SNIRH, o qual permite conhecer e disponibilizar dados e informação sobre os cursos de água, as albufeiras e as precipitações observadas nas bacias hidrográficas monitorizadas. Com este objetivo, o sistema é constituído por uma rede de estações de medição com teletransmissão, que medem variáveis hidrometeorológicas, recebendo também dados fornecidos por entidades externas à Autoridade Nacional da Água (e.g., EDP e Reino de Espanha), e por uma estrutura informática para armazenamento e disseminação da informação. Assim, o sistema encontra-se dividido em três módulos, associados a três funções diferentes (Fig. 5.15):

- Aquisição de dados – conjunto de estações de medição com teletransmissão e intercâmbio de dados com outras entidades.
- Central de comando – sistema informático de recolha de dados das estações, troca de dados com outras entidades, processamento e armazenamento dos dados, elaboração de modelos hidrológicos e hidráulicos.
- Disponibilização de dados – programa informático para a disponibilização em tempo-real dos dados adquiridos pela Central de Comando.

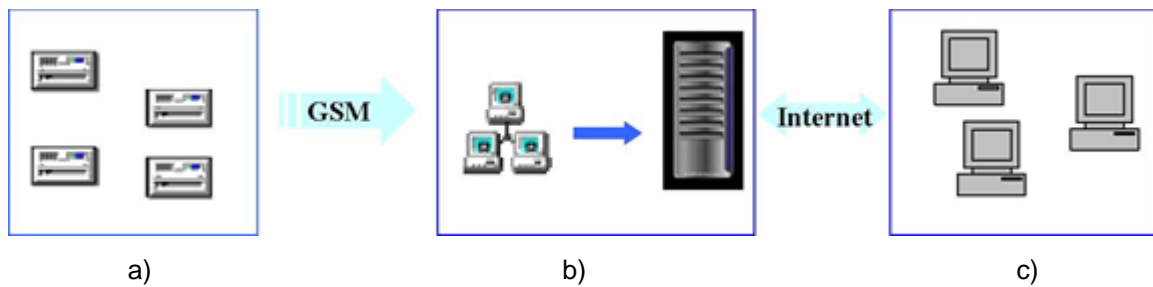


Figura 5.15 – Módulos do SVARH: a) aquisição de dados, b) central de comando e c) disponibilização de dados.

O SVARH associado à zona geográfica em estudo tem, apenas, dois modelos hidrológicos de previsão (Quadro 5.17), cujos modelos foram construídos com o HEC-HMS e recorrendo ao hidrograma unitário curvilíneo do SCS (metadados dos modelos, isto é, informação relativa à modelação realizada). Nesta zona geográfica, os alertas hidrológicos têm sido realizados mediante a comparação, em tempo-real, entre as precipitações observadas e os valores associados às curvas Intensidade-Duração frequência (IDF) e a comparação entre os níveis hidrométricos observados e os limiares hidrométricos definidos nas estações hidrométricas, baseados nos máximos das séries históricas (Fig. 5.16).

Quadro 5.17 – Modelos hidrológicos de previsão desenvolvidos no âmbito do SVARH para a área metropolitana de Lisboa.

Zona abrangida	Início	Fim	Informação sobre o evento de cheia
Queluz-Belas	17-02-08 12:00	18-02-08 12:00	Duas pessoas morreram quando a sua viatura foi arrastada da EN117 para o rio do Jamor. Calibração para a secção da Senhora da Rocha com resultados razoáveis.
Loures	17-02-08 12:00	20-02-08 00:00	Melhores resultados com a calibração para Monte da Caparica do que de São Julião do Tojal. Pico superior a 300 m³/s dia 18 para a secção de Ponte Pinhal com resultados razoáveis.

O SVARH, para que seja eficaz, deverá ser capaz de emitir alertas antecipados credíveis. Assim, deverá assegurar a monitorização contínua de base à modelação hidrológica de previsão, que será o suporte para os alertas hidrometeorológicos. A modelação da previsão implica identificar as estações hidrometeorológicas relevantes para descrever o evento de cheias, escolher o método mais adequado de transformação da precipitação em caudal, e por fim, os resultados deverão ser validados através de caudais medidos, que são fundamentais para a credibilização de qualquer sistema de alerta.

A diminuição da vulnerabilidade da sociedade potencialmente atingida pelas cheias é concretizada mediante melhorias na modelação (mais assertiva porque mais robusta). Estas melhorias são incorporadas através de:

- a) utilização de curvas de vazão válidas (para caudais mais elevados);
- b) utilização de modelos calibrados (melhores opções);
- c) utilização de várias combinações de estações udográficas;
- d) utilização de uma possível distribuição espacial da precipitação baseada nas estações udográficas (e.g., com Polígonos de Thiessen);
- e) incorporação da precipitação do radar com uma calibração mais adequada e porque se utiliza a informação do radar que abrange uma área territorial mais abrangente;
- f) introdução de previsão de precipitação.

A consideração das melhorias, mencionados anteriormente, de forma individual ou em combinação, permite aumentar a antecedência do aviso, que será mais rigoroso, e, por conseguinte, aumentar o tempo disponível para a atuação da proteção civil. Deste modo, ocorre a diminuição da vulnerabilidade da sociedade face à ocorrência de inundações decorrentes das cheias.

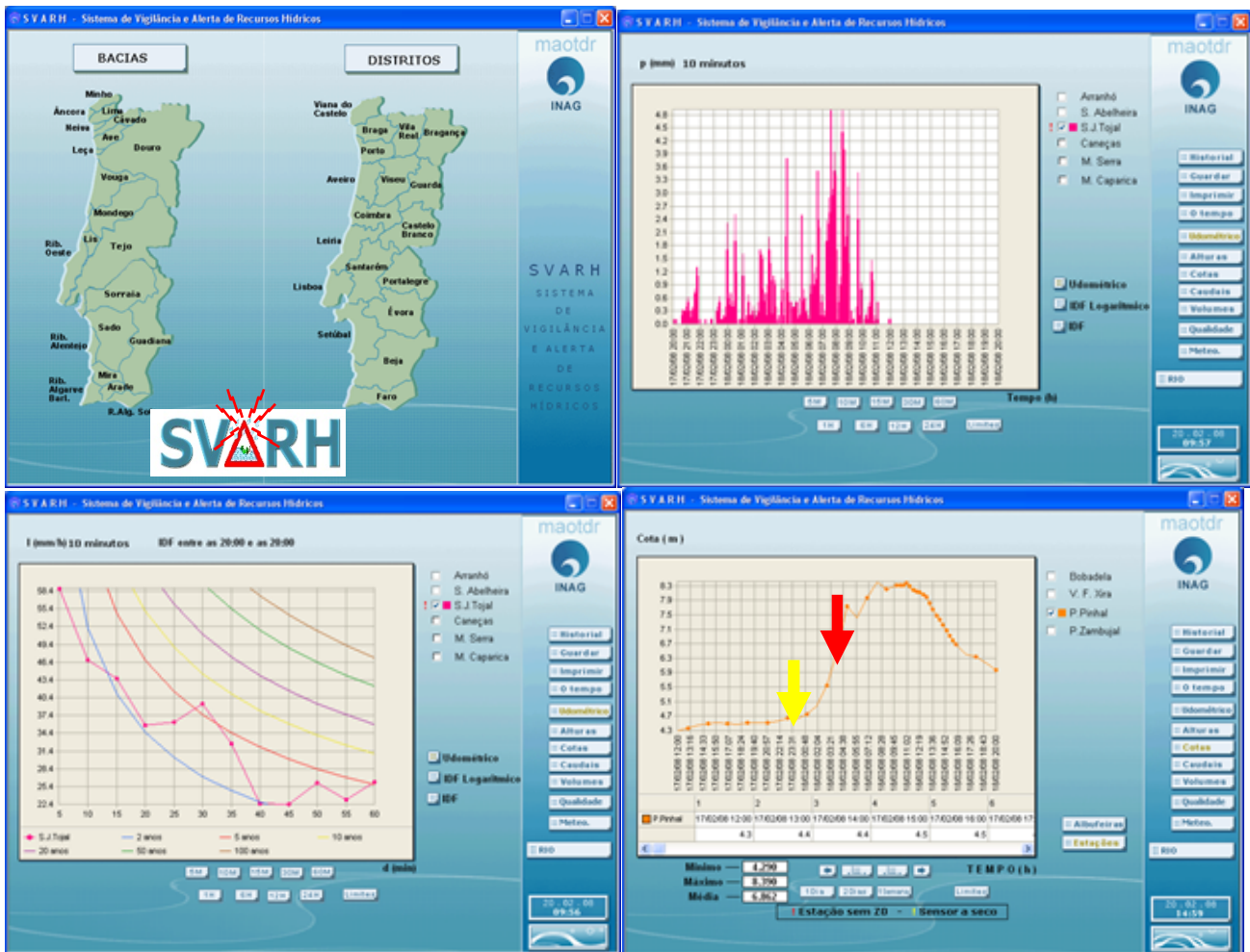


Figura 5.16 – Sinópticos do SVARH associados à zona metropolitana de Lisboa, com os registos efetuados durante a cheia de 18 de fevereiro de 2008 (estação meteorológica de São Julião do Tojal e estação hidrométrica de Ponte Pinhal).

Este estudo teve como objetivo fornecer informação relevante para introduzir melhorias no atual SVARH, para a área metropolitana de Lisboa, nomeadamente, indicação da distribuição espaço-temporal da precipitação que melhores resultados poderá fornecer à modelação hidrológica, o modelo de transformação precipitação-escoamento, tanto considerando o caudal de ponta como o tempo para a ponta de cheia, e a melhor calibração da informação do radar meteorológico de Coruche. Foi também possível avaliar a validade das curvas de vazão que suportam os hidrogramas observados e reproduzidos no processo de simulação.

Considerando o estado de desenvolvimento atual do SVARH, o estudo permite que este integre mais modelos hidrológicos de previsão, devidamente sustentados nos melhores hidrogramas unitários adaptados às diferentes bacias hidrográficas da zona metropolitana de Lisboa e, assim, diminuir a vulnerabilidade da população.

Como referido na introdução, os hidrogramas de cheia obtidos com a modelação hidrológica, assim como os respetivos níveis hidrométricos no curso de água, correspondem aos dados de entrada do modelo hidráulico, com o qual se estimam as cotas e as áreas inundadas associadas a cada acontecimento hidrometeorológico.

No futuro, o modelo hidráulico utilizará os resultados do modelo hidrológico e as diversas informações topográficas: cartas militares à escala 1:25 000 ou escalas maiores, adaptadas à caracterização local da zona, perfis transversais das secções das estações hidrométricas e das secções próximas de estrangulamentos ou na confluência com cursos de água relevantes, e marcas de cheia localizadas nas zonas geográficas em análise.

A partir desta informação topo-batimétrica caracteriza-se a rede hidrográfica, em termos de declive longitudinal dos diversos troços e as secções transversais de controlo, e tendo conhecimento do estado de conservação da rede hidrográfica (traduzido pelo coeficiente de rugosidade de Manning) e dos valores de escoamentos (fornecidos pelo modelo hidrológico) determinam-se os níveis de inundação, através da modelação hidráulica. Esta modelação poderá ser realizada recorrendo, por exemplo, à utilização do programa HEC-RAS, versão 4.1 (2010).

5.7. Discussão dos resultados

Neste capítulo foi utilizada informação apresentada e produzida ao longo dos capítulos 2, 3 e 4, sendo que o objetivo foram simulados 68 acontecimentos hidrometeorológicos e identificadas as metodologias mais apropriadas para obter os caudais de cheia em cinco bacias hidrográficas, localizadas na área metropolitana de Lisboa, associadas aos seguintes cursos de água: ribeira de Caparide, rio Jamor, ribeira das Lajes, ribeira de Loures e ribeira da Barcarena.

No que concerne às estimativas das precipitações concluiu-se que:

- a) As precipitações iniciais do radar e as ajustadas (calibradas) médias sobre as bacias, independentemente do método utilizado para estimar os valores médios nas áreas (Polígonos de Thiessen ou IDW2-6), são muito diferentes, sendo que estas diferenças dependem, ainda, da bacia hidrográfica em análise (Fig. 3.24 e Fig. 5.2). Assim, a calibração dos dados do radar meteorológico, adaptada a cada bacia hidrográfica, conduziu a alterações significativas das estimativas iniciais das precipitações.
- b) A razão média relativa à precipitação total de sete acontecimentos pluviosos entre as estimativas do radar meteorológico calibrado com Polígonos de Thiessen ou com IDW2-6 e o radar meteorológico sem calibração é, respetivamente, de 2 e de 2,1 (Fig. 5.3).
- c) A melhor distribuição espaço temporal da precipitação, visando a estimativa do hidrograma total dos acontecimentos hidrometeorológicos, é obtida recorrendo ao método dos Polígonos de Thiessen e do radar calibrado com Polígonos de Thiessen.
- d) A bacia hidrográfica mais pequena (definida na Quinta das Camilas) poderá ter problemas na caracterização da precipitação, pois são poucas as estações de base à sua caracterização e localizadas, por vezes, longe do seu limite (não caracterizando o fenómeno meteorológico responsável pela precipitação), dificultando a estimativa da precipitação sobre esta área.

No que concerne às estimativas dos hidrogramas dos acontecimentos hidrometeorológicos foi possível concluir que:

- a) A forma dos hidrogramas simulados é reproduzida em diversos acontecimentos hidrometeorológicos, sendo o volume simulado frequentemente inferior ao observado, o que poderá significar um défice de precipitação estimada ou um excesso de estimativas de perdas. Quando ao longo do hidrograma simulado e observado não existem diferenças relevantes significa que as precipitações ponderadas e os restantes processos do ciclo hidrológico associados à estimativa de escoamento (interceção, infiltração e retenção superficial) estão próximos da realidade.

- b) As maiores diferenças relativas aos caudais de ponta estarão relacionadas com a falta de ajustamento das curvas de vazão para os caudais mais elevados, enquanto as pequenas diferenças indicam que as curvas de vazão estarão válidas.
- c) Os melhores resultados da simulação estão geralmente associados ao acontecimento hidrometeorológico de 2008, com exceção da bacia definida em Quinta das Camilas. Esta exceção deve-se à utilização do valor elevado do caudal de base no instante t_0 , que resulta das médias da análise efetuada aos vários acontecimentos hidrometeorológicos, aquando da determinação do hidrograma unitário (Quadro 4.9), não refletindo as condições hidrológicas específicas deste acontecimento hidrometeorológico.
- d) As simulações com melhor ajustamento foram obtidas recorrendo ao hidrograma unitário sintético de Temez, sendo que na estimação do caudal de ponta e o do tempo para a ponta existe uma tendência para obter melhores resultados com a utilização do hidrograma unitário Específico.
- e) A simulação hidrológica, com o recurso à informação do radar meteorológico calibrado com os Polígonos de Thiessen, melhorou em relação à utilização da precipitação obtida através dos Polígonos de Thiessen.
- f) Para as duas bacias com ausência de dados hidrométricos adequados (Ponte Zambujal e Colares), os caudais de ponta de cheia obtidos recorrendo aos hidrogramas unitários sintéticos aplicáveis à região são semelhantes aos obtidos através da aplicação do hidrograma unitário sintético de Temez (o que melhor reproduz os acontecimentos simulados).

O processo de modelação hidrológica foi suportado com dados que por vezes não permitem cumprir com alguns requisitos dos métodos de simulação aplicados. Assim:

- a) A qualidade dos resultados obtidos poderá ser justificada com aspetos relacionadas com a aplicabilidade dos modelos para determinação do escoamento, referidas no HEC-HMS (2000) (subcapítulo 5.4). A consideração de dados e informação hidrológica obtidos com mais medição de campo (e.g., medições de caudais elevados e das perdas) permitirá melhorar a calibração dos parâmetros dos modelos (e.g., diversos dados de entrada e hidrograma unitários), em detrimento da utilização dos modelos empíricos disponíveis neste programa informático.
- b) A discretização temporal horária das séries hidrometeorológicas tem influência no processo de simulação, conduzindo à aplicação dos hidrogramas unitários do SCS e de Temez com intervalos temporais não recomendados, Eqs. (4.18) e (4.34). Isto é, a aplicação do método do hidrograma unitário do SCS nas bacias hidrográficas analisadas exige intervalos temporais do hietograma e do hidrograma inferiores à hora, informação não disponível para realizar a simulações, pois o menor intervalo temporal dos dados é horário. No caso do hidrograma unitário de Temez existem três bacias onde não é cumprida a condição sobre o intervalo de tempo do hietograma e do hidrograma: Quinta das Camilas, Senhora da Rocha e Colares.
- c) O tamanho das bacias hidrográficas simuladas poderá, eventualmente, estar a influenciar o resultado da aplicação das metodologias dos hidrogramas unitários do SCS, uma vez que existem duas bacias com áreas superiores às recomendadas, Ponte Zambujal e Ponte Pinhal (capítulo 4).

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Enquadramento

Os resultados obtidos foram apresentados no final de cada capítulo ou subcapítulo, sendo no presente capítulo efetuada uma síntese, em que se descreve o respetivo enquadramento e se salientam os contributos mais relevantes para a hidrologia da região de Lisboa, no que se refere à ocorrência de cheias.

Considera-se relevante salientar que é a primeira vez que são utilizados dados provenientes do radar meteorológico situado em Cruz do Leão (Coruche), fornecidas pelo IPMA, I.P., para caraterizar a precipitação pontual e espacial e para estimar caudais de cheia. A existência destes dados permitiu comparar as estimativas da distribuição espacial da precipitação obtidas com os métodos dos Polígonos de Thiessen e do Inverso da Distância, com potência de dois e seis vizinhos (IDW2-6), com os obtidos através do radar meteorológico não calibrado e calibrado (com Polígonos de Thiessen ou com IDW2-6). Nesta análise, optou-se por considerar como “verdade do terreno” os registos dos udógrafos.

Em virtude de terem sido apenas disponibilizadas estimativas de intensidade de precipitação do radar, em detrimento da refletividade, foram estabelecidas relações $U - R$, isto é, relações do tipo potencial entre a intensidade de precipitação observada nos udógrafos (U) e as estimadas pelo radar (R), sendo propostas relações pontuais e espaciais. Deste modo, pretendeu-se corrigir as estimativas pré-definidas pelo radar meteorológico de Cruz do Leão (Coruche).

De realçar o grande número de dados avaliados em comparação com outros estudos no mesmo campo científico, sendo ainda, tanto quanto é do conhecimento da autora, a primeira vez que são avaliados de forma abrangente em Portugal, os dados de intensidade de precipitação obtidos através das refletividades medidas pelo radar meteorológico.

Realçar também a preocupação em obter hidrogramas unitários aplicáveis à área metropolitana de Lisboa e em os comparar com os utilizados habitualmente, em Portugal, para a determinação de caudais de ponta de cheia, quer no âmbito do projeto, quer no aviso hidrológico de cheias (SCS e Temez).

O estudo procurou utilizar metodologias para caracterizar a precipitação e o escoamento propostas por outros autores, e verificar a sua aplicabilidade (relacionadas com a obtenção das isócronas, dos hidrogramas unitários e da validação de relação $Z-R$), bem como propor novas metodologias e fornecer informação para melhorar a caracterização das cheias.

O estudo recorreu ao programa HEC-HMS, versão 3.5 (2010), desenvolvido no *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *Army Corps of Engineers* dos Estados Unidos da América (USACE, 2010), amplamente utilizado e validado. No processo de modelação hidrológica foram simulados e avaliados os resultados produzidos em 62 períodos temporais, associados às cinco bacias hidrográficas das estações hidrométricas consideradas, com áreas compreendidas entre 10 km² (Quinta das Camilas) e 78 km² (Ponte Pinhal).

O radar meteorológico de Cruz do Leão, calibrado, permite estimar, de forma credível, precipitações na sua área de monitorização (área com 150 km de raio centrada no radar), a qual corresponde a uma grande parte da bacia hidrográfica nacional do rio Tejo e à Zona Oeste.

Em conjugação com o método de obtenção da precipitação útil e com o conhecimento do hidrograma unitário mais adequado, permite efetuar simulações hidrológicas mais fiáveis e, portanto, alertar de forma mais assertiva a população e, simultaneamente, diminuir a vulnerabilidade e, conseqüentemente, os riscos associados às cheias.

6.2. Conclusões

6.2.1. Do Capítulo 2

No capítulo 2 foram expostos os dados utilizados no estudo (hidrometeorológicos e sinóticos) e avaliadas a sua consistência ou homogeneidade (precipitações) e abrangência de aplicabilidade (curvas de vazão). Nesse capítulo, procedeu-se à comparação entre as estimativas da precipitação média sobre as sete bacias hidrográficas e sobre a região hidrográfica constituída pelo conjunto das bacias hidrográficas, que abrangem uma área contínua.

A caracterização da distribuição espacial da precipitação mostrou que os valores da precipitação horária ponderada em área nas sete bacias hidrográficas, analisadas estimados pelo método IDW2-6, foram cerca de 97 % dos estimados pelo método dos Polígonos de Thiessen.

6.2.2. Do Capítulo 3

No capítulo 3 efetuou-se uma revisão bibliográfica sobre os procedimentos de calibração de radares meteorológicos e sobre as formas de avaliação da qualidade desta calibração (alínea 3.1.2.). No presente estudo utilizou-se um CAPPI a baixa altitude e um grande número de estações udográficas (1 estação/12 km²), com elevado número de registos simultâneos do radar e dos udógrafos, o que permitiu obter uma informação de base de elevada qualidade quando comparada com a utilizada nos estudos consultados.

A definição de limiares mínimos de refletividade no radar ou de precipitação nos udógrafos, não foi considerada, e os períodos temporais pré-selecionados permitiram evitar a existência de numerosos instantes com precipitações insignificantes. Por outro lado, face à grande resolução espacial dos dados do radar (1 km x 1 km), foi possível relacionar com precisão a célula do radar com a localização da estação udográfica, não sendo necessário selecionar uma área mais alargada do que a célula onde se localiza o udógrafo, conforme foi utilizado em diversos estudos similares (alínea 3.1.2.).

No âmbito da calibração do radar meteorológico de Coruche foram obtidas diferentes relações entre as intensidades de precipitação observadas nos udógrafos (U) e as estimadas através do radar (R), como resultado das seguintes análises:

- Análise pontual global ($U - R_{\text{global}}$), em que se considerou a totalidade dos registos das estações udográficas ($U - R_{\text{estação}}$) e das respetivas células do radar na zona geográfica em análise;
- Análise pontual associada a dois tipos sinóticos, em que se considerou a totalidade dos registos das estações udográficas e das respetivas células na zona em análise, mas cujo evento chuvoso foi pré-classificado de acordo com o fenómeno meteorológico responsável pela precipitação em análise ($U - R_{\text{tipologia}}$);
- Análise espacial por bacia hidrográfica e por região geográfica, sendo esta última resultante da integração das sete bacias hidrográficas ($U - R_{\text{área}}$).

As relações obtidas estimam intensidades de precipitação em caso de ausência de registo udográfico, permitindo obter uma distribuição espacial da precipitação e integrar a informação proveniente da monitorização efetuada por diferentes tecnologias.

Com base nas análises pontual global e sinótica, pôde concluir-se que:

- As relações $U - R_{\text{global}}$, por ano e por tipologia sinótica, independentemente da qualidade do seu ajustamento, indicam que o radar subestima as intensidades de precipitação horárias.
- A relação $U - R_{\text{global}}$ (2006, 2008) não apresenta melhor ajustamento que a $U - R_{\text{global}}$ (2003, 2006, 2008), considerando avaliações do REQM e do ERM, estando contudo associada a uma melhoria da sua correlação, passando de moderada ($r = 0,57$) a correlação forte ($r = 0,65$), segundo Franzblau (1958, cit. por Pallaoro, et al. 2016), e reflete o processamento que o radar atualmente realiza. A relação $U - R_{\text{global}}$ (2006, 2008), embora não apresente um bom ajustamento, poderá corrigir significativamente a subestimação generalizada efetuada pelo radar, devido à redução do número de pares de valores com intensidade de precipitação não nulas no radar e nulos nos registos udográficos e, simultaneamente, conduzir a que os registos udográficos com maiores intensidades tenham maior peso no ajustamento da relação. Assim, por exemplo, uma intensidade de precipitação horária estimada pelo radar de 20 mm h^{-1} corresponderá na superfície terrestre, por aplicação da relação global proposta (com dados de 2006 e 2008), a 35 mm h^{-1} , em substituição dos 17 mm h^{-1} , que se obtém pelo radar calibrado com 2003, 2006 e 2008.
- As relações $U - R_{\text{tipologia}}$ permitem considerar duas situações sinóticas distintas conduzindo a grandes diferenças nas intensidades de precipitação determinadas consoante o fenómeno é, fundamentalmente, depressionário – tipo 2 (maiores intensidades) ou frontal – tipo 1 (menores intensidades). Todavia, esta abordagem não produz melhorias significativas em comparação com a relação $U - R_{\text{global}}$ (2006, 2008), pelo que não foram consideradas na simulação hidrológica.

Considerando a análise espacial, pôde concluir-se que:

- As relações $U - R_{\text{área}}$ permitem obter as intensidades de precipitação para as oito zonas geográficas estudadas em caso de ausência total de observações udográficas (sete bacias hidrográficas e a área resultante do conjunto das sete bacias hidrográficas).
- O ajustamento das relações $U - R_{\text{área}}$ melhora, em geral, quando não são considerados os valores de 2003, como é possível verificar pela evolução dos parâmetros REQM e ERM, sendo a melhoria mais evidente em termos de ERM.
- As melhores relações $U - R_{\text{área}}$ correspondem à bacia hidrográfica de Senhora da Rocha e ao conjunto das sete bacias hidrográficas.

- As relações $U - R_{\text{área}}$ obtidas com os Polígonos de Thiessen ou com os IDW2-6 não diferem significativamente, verificando-se uma tendência para obter os piores resultados nos parâmetros de avaliação do ajustamento quando a estimativa é efetuada através de IDW2-6.

Considerando os resultados da calibração do radar meteorológico foi possível ainda concluir que:

- A relação $Z - R_{\text{global}}$ estima valores de intensidade de precipitação superiores aos obtidos pela relação $Z - R$ utilizada na operação do radar meteorológico situado em Cruz do Leão (Marshall e Palmer, 1948) e próximo da relação proposta por Ciach, *et al.* (1997), para a relação associada à distância de 150 km. A relação $Z - R_{\text{global}}$ estima intensidades de precipitação inferiores às de Ciach, *et al.* (1997), até refletividades de cerca de 41 dBZ (24 mm h^{-1}), intensidade de precipitação horária muito inferior aos máximos históricos registados em Portugal ($95,7 \text{ mm h}^{-1}$, Monchique em 1997) e na zona de Lisboa ($63,5 \text{ mm h}^{-1}$, Oeiras em 1967). Portanto, não haverá subestimação para maiores refletividades potencialmente responsáveis pelas maiores precipitações e consequentemente pela ocorrência de cheias.
- A estimativa de uma mesma intensidade de precipitação a partir dos registos dos udógrafos e do radar meteorológico em Cruz do Leão obrigará a alterar a relação $Z - R$ ou, se apropriado e caso seja possível, melhorar o seu funcionamento (e.g., realizando a integração de um maior número de amostras a diferentes altitudes), sendo que esta alteração poderá conduzir à medição de maiores refletividades. As duas opções permitirão ao radar estimar maiores intensidades de precipitação, aproximando estes valores às intensidades de precipitação registadas nos udógrafos.

6.2.3. Do Capítulo 4

No capítulo 4 apresentam-se os processos do ciclo hidrológico relacionados com o ramo terrestre, que suportam a determinação dos caudais de cheia. Os hidrogramas unitários “observados”, determinados para as bacias hidrográficas definidas nas cinco estações hidrométricas (Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal), resultaram da análise de registos simultâneos hidrométricos e udográficos contínuos. As características fisiográficas das bacias hidrográficas permitiram determinar os hidrogramas unitários sintéticos, de Temez e do SCS, e os hidrogramas unitários segundo Clark. Para a identificação destes últimos determinaram-se as isócronas das bacias hidrográficas através das seguintes abordagens: hidrológica, com Kirpich (Lencastre e Franco, 1984) e com Huggins e Burney (1982, cit. por Matias 2006b), e hidráulica, com Liu, *et al.* (2003).

A partir dos hidrogramas do escoamento total obtiveram-se os hidrogramas de escoamento direto nas bacias hidrográficas monitorizadas, através de técnicas semi-empíricas de separação dos componentes do hidrograma. Cada um destes hidrogramas do escoamento direto foi utilizado na parametrização do método de estimativa do correspondente hietograma de precipitação útil, que exigiu uma análise individual de cada acontecimento hidrometeorológico, dificultando a automatização deste processo. A partir desta informação foram determinados os hidrogramas unitários, designados de observados.

Os hidrogramas de escoamento direto analisados apresentam as seguintes características:

- Em média, os caudais de ponta (Q_p) variam entre $9,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (na menor bacia hidrográfica analisada) e $31,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (na maior bacia hidrográfica analisada), os caudais de base (Q_{bo}) entre $0,01$ e $2,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e os caudais de início de recessão entre $0,01$ e $3,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- Em média, nos hidrogramas de escoamento direto, os tempos para a ponta (T_p) são aproximadamente de 7 h, os tempos de atraso (t_i) variam entre 1,06 e 3,48 h, enquanto os tempos de concentração (t_c) estão compreendidos entre 2,83 e 6,53 h (hietograma de precipitação útil obtido com o método de perdas do SCS).
- Os Números de Escoamento calibrados (N) médios estão compreendidos entre 72,2 (Senhora da Rocha) e 91,6 (Laveiras), com desvios-padrão de 7,7 (Laveiras) a 19,0 (Senhora da Rocha), o que corresponde a grandes diferenças entre as capacidades de armazenamento das bacias hidrográficas (S). Com exceção da bacia hidrográfica definida em Ponte Pinhal e Senhora da Rocha, os Números de Escoamento calibrados médios são superiores aos valores pré-definidos associados a AMC_{II} , sendo o valor médio do Número de Escoamento calibrado em Ponte Pinhal muito próximo do Número de Escoamento inicial (AMC_{II}). As bacias definidas pelas estações hidrométricas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional e Laveiras, apresentam Números de Escoamento calibrados próximos de 90, sendo Laveiras a única situação em que o valor médio calibrado é superior ao pré-definido para AMC_{III} .
- O escoamento de base médio representa 29 %, com desvio-padrão de 20 %, do escoamento total.
- As perdas iniciais obtidas pela análise dos 68 acontecimentos hidrometeorológicos correspondem a 3 % da retenção potencial máxima de água do solo da bacia hidrográfica, logo menor que os 20 % preconizados pela metodologia do SCS (1972 e 1973). Contudo, o valor determinado é próximo dos 5 % proposto por Mishra e Singh (2003) e (Hawkins, *et al.*, 2006) e vai ao encontro das considerações de Correia (1984a e 1984b).

Em relação aos hidrogramas unitários observados finais, verifica-se que:

- Os tempos para a ponta e de base (t_p e t_b) são geralmente menores quando o hidrograma unitário observado é determinado considerando o método de perdas SCS, comparativamente com os obtidos pelo método do índice Φ .
- Têm durações de base maiores que os tempos de concentração médios observados nas bacias hidrográficas analisadas.
- Os caudais de ponta (u_p) variam entre $0,903$ e $7,079 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por mm h^{-1} , sendo os maiores valores associados ao método de perdas SCS.
- Considerando o método de perdas SCS, os caudais adimensionais estão compreendidos entre 0,328 e 0,599.
- O método de perdas SCS foi o selecionado para o processo de simulação hidrológica, uma vez que apresenta as menores médias dos valores horários obtidos na minimização do somatório do quadrado dos erros, processo matemático que suporta a determinação dos hidrogramas unitários observados.

Determinaram-se quatro tipos de diagramas tempo-área que suportam os hidrogramas unitários agregados finais de Clark (Kirpich, Huggins e Burney e duas versões do método de Liu, *et al.*, 2003). Tais hidrogramas unitários apresentam as seguintes características:

- Os coeficientes de armazenamento (K) aumentam, os caudais de ponta dos hidrogramas unitários decrescem e os tempos para a ponta mantêm-se quando se comparam os métodos de perdas SCS e do índice Φ .
- Os maiores coeficientes de armazenamento e os menores caudais de ponta dos hidrogramas unitários são observados na menor bacia hidrográfica analisada (estação da Quinta das Camilas) e os menores coeficientes de armazenamento e maiores caudais de ponta nas estações de Senhora da Rocha e Ponte Pinhal. Os maiores e menores tempos para a ponta são obtidos, respetivamente, na maior bacia hidrográfica analisada (estação de Ponte Pinhal) e na menor bacia hidrográfica (Quinta das Camilas).
- A aplicação dos quatro métodos conduziu a tempos de base entre 4 h (Senhora da Rocha) e 25 h (todas as bacias, exceto Laveiras), sendo que as maiores durações estão associadas ao método de perdas segundo o método do índice Φ e as mínimas ao método do SCS.
- Na determinação dos hidrogramas unitários agregados finais de Clark, os coeficientes de armazenamento obtidos variam entre 0,486 e 5,091 h (isócronas calculadas com o método hidrológico e considerando qualquer método de perdas) ou entre 1,21 e 4,827 h (isócronas calculadas com o método hidráulico e considerando qualquer método de perdas), sendo que o tempo para a ponta é, geralmente, menor nos processos hidráulicos, nomeadamente considerando as perdas do SCS. Considerando qualquer método de perdas, os caudais de ponta estão compreendidos entre 0,530 e 5,863 m³ s⁻¹ por mm h⁻¹ (método hidrológico) ou entre 0,528 e 5,698 m³ s⁻¹ por mm h⁻¹ (método hidráulico).

Os valores de ponta adimensionais dos hidrogramas unitários agregados de Clark são maiores do que os obtidos nos hidrogramas unitários observados, em qualquer das bacias hidrográficas analisadas e independentemente do método de perdas adotado. Os tempos para a ponta dos hidrogramas unitários observados é, geralmente, próximo dos hidrogramas unitários agregados de Clark obtidos pelos métodos hidrológicos.

Quanto aos hidrogramas unitários Específicos obtidos, verifica-se que os valores do fator de forma (K_g), resultante do ajustamento dos hidrogramas unitários adimensionais padronizados à função densidade de probabilidade Gama, variaram entre 2,870 e 9,182, sendo o menor associado à maior bacia hidrográfica (Ponte Pinhal).

O hidrograma unitário sintético aplicável à região (alternativo ao Temez ou ao SCS) foi obtido por regressão múltipla, com métodos de *backward elimination* ou de *stepwise regression*, entre as características fisiográficas e as hidrológicas (q_p , K_g , t_b e t_p/t_b). Este procedimento permitiu:

- Identificar o conjunto de coeficientes de regressão associados às características fisiográficas significativas, entre as seis avaliadas: área da bacia hidrográfica, área urbana, declive do curso de água principal da bacia hidrográfica, declive médio da bacia hidrográfica, comprimento do curso de água principal e comprimento médio do escoamento superficial.
- Definir as expressões matemáticas que permitem estimar q_p , K_g , t_b e t_p/t_b , sendo estas associadas a coeficientes de determinação (r^2) superiores a 0,90. Os hidrogramas unitários sintéticos aplicáveis à região, obtidos para cada uma das bacias hidrográficas, têm configurações muito semelhantes às dos hidrogramas unitários observados, exceto na bacia hidrográfica da Senhora da Rocha.

As características hidrológicas do hidrograma unitário sintético único obtido são substancialmente diferentes das propostas pelo método do SCS (1972). Assim, verifica-se:

- Uma redução nas constantes que permitem obter o tempo de base e o tempo de atraso a partir, respetivamente, do tempo para a ponta e do tempo de concentração.
- Um aumento da constante que permite determinar o caudal de ponta unitário através da área e do tempo para a ponta. Isto significa um maior contributo do quociente entre a área da bacia hidrográfica e o tempo para a ponta do que o proposto pelo SCS (1972).
- Uma redução do tempo de base do hidrograma unitário triangular único em relação ao proposto pelo SCS (1972). A relação entre o tempo de atraso e o tempo de concentração observados é de 0,5285, semelhante à proposta por SCS (0,600), havendo uma diferença de cerca de 0,07.
- Adicionalmente, que o tempo de concentração determinado pelo método de Temez é, geralmente, o que mais se aproxima do tempo de concentração observado, considerando o método de perdas do SCS.

6.2.4. Do Capítulo 5

No capítulo 5 foram simulados 68 acontecimentos hidrometeorológicos (62 períodos temporais) e identificadas as metodologias mais apropriadas para obter os caudais de cheia nas cinco bacias hidrográficas, localizadas na área metropolitana de Lisboa, associadas aos seguintes cursos de água: ribeira de Caparide, rio Jamor, ribeira das Lajes, ribeira de Loures e ribeira da Barcarena.

Os hidrogramas unitários observados, os hidrogramas unitários agregados de Clark (Liu, *et al.*, 2003, com raio hidráulico unitário na secção de referência da bacia hidrográfica), o hidrograma unitário Específico e os hidrogramas unitários sintéticos de Temez (1978) e de SCS (1972 e 1973) foram considerados na simulação dos acontecimentos hidrometeorológicos (HEC-HMS, versão 3.5, com método de perdas do SCS, distribuição espaço temporal da precipitação com Polígonos de Thiessen e radar meteorológico calibrado). Quanto às estimativas das precipitações, concluiu-se que:

- a) A melhor distribuição espaço temporal da precipitação, visando a estimativa do hidrograma total dos acontecimentos hidrometeorológicos, é obtida recorrendo ao método dos Polígonos de Thiessen e do radar calibrado com Polígonos de Thiessen.

No que concerne às estimativas dos hidrogramas dos acontecimentos hidrometeorológicos foi possível concluir que:

- a) A forma dos hidrogramas simulados é reproduzida em diversos acontecimentos hidrometeorológicos, sendo o volume simulado, frequentemente, inferior ao observado, o que poderá significar um défice de precipitação estimada ou um excesso de estimativa de perdas.
- b) As maiores diferenças relativas aos caudais de ponta estarão relacionadas com a falta de ajustamento das curvas de vazão para os caudais mais elevados, enquanto as pequenas diferenças indicam que as curvas de vazão estarão válidas.
- c) Os melhores resultados da simulação estão geralmente associados ao acontecimento hidrometeorológico de 2008, com exceção da bacia definida em Quinta das Camilas. Esta exceção

deve-se à utilização do valor elevado do caudal no instante t_0 , que resulta das médias da análise efetuada aos vários acontecimentos hidrometeorológicos aquando da determinação do hidrograma unitário (Quadro 4.9), não refletindo as condições hidrológicas específicas deste acontecimento hidrometeorológico.

- d) As simulações com melhor ajustamento foram obtidas recorrendo aos hidrogramas unitários segundo Temez, sendo que na estimação do caudal de ponta e do tempo para a ponta existe uma tendência para obter melhores resultados com a utilização do hidrograma unitário Específico.
- e) A simulação hidrológica com o recurso à informação do radar meteorológico calibrado com os Polígonos de Thiessen melhorou em relação à utilização da precipitação obtida através dos Polígonos de Thiessen.
- f) Para as duas bacias com ausência de dados hidrométricos adequados (Ponte Zambujal e Colares), os caudais de ponta de cheia obtidos recorrendo aos hidrogramas unitários sintéticos para a região estudada são semelhantes aos obtidos através da aplicação do hidrograma unitário sintético de Temez (o que melhor reproduz os acontecimentos simulados).

O processo de modelação hidrológica foi suportado em dados que, por vezes, não permitiam cumprir com alguns requisitos dos métodos de simulação aplicados. Assim:

- a) A qualidade dos resultados obtidos poderá ser justificada com aspetos relacionadas com a aplicabilidade dos modelos de caracterização dos processos do ciclo hidrológico para determinação do escoamento, referidas pelo no HEC-HMS (2000), por exemplo, mais medições de campo associadas a caudais elevados permitirá utilizar dados de entrada mais fiáveis e, por conseguinte, melhores resultados no ajustamento.
- b) A discretização temporal horária das séries hidrometeorológicas tem influência no processo de simulação, conduzindo à aplicação dos hidrogramas unitários do SCS e de Temez com intervalos temporais superiores aos recomendados. No caso do hidrograma unitário de Temez existem três bacias onde não é cumprida a condição sobre o intervalo de tempo do hietograma e do hidrograma: Quinta das Camilas, Senhora da Rocha e Colares.
- c) As bacias hidrográficas analisadas têm áreas compreendidas entre 10 e 100 km², logo têm dimensão adequada para aplicar o hidrograma unitário sintético de Temez. Contudo, uma vez que existem duas bacias hidrográficas com áreas superiores às recomendadas para aplicação do hidrograma unitário sintético curvilíneo do SCS (52 km²), designadamente as definidas em Ponte Zambujal com 99 km² (rio Trancão) e em Ponte Pinhal com 78 km² (ribeira de Loures), tal poderá influenciar negativamente a qualidade da modelação hidrológica.

6.3. Considerações finais

A diminuição da vulnerabilidade da sociedade potencialmente atingida pela ocorrência de inundações decorrentes das cheias depende, entre outros fatores, dos melhoramentos que se introduzam na modelação hidrológica de previsão. Estes melhoramentos decorrerão dos seguintes aspetos:

- a) utilização de curvas de vazão válidas (com ênfase para os caudais mais elevados);
- b) utilização de modelos calibrados;

- c) calibração dos modelos com diferentes combinações de estações udográficas;
- d) utilização de uma distribuição espacial da precipitação baseada nas estações udográficas;
- e) incorporação da precipitação do radar com uma calibração mais adequada e robusta;
- f) introdução de previsão de precipitação (melhoria na antevisão meteorológica relacionada com a quantificação da precipitação);
- g) Incorporação de modelos hidrológicos distribuídos.

A consideração dos melhoramentos mencionados anteriormente, de forma individual ou em combinação, permitirá aumentar a antecedência e o rigor do aviso e, por conseguinte, aumentar o tempo disponível para a atuação da proteção civil.

O presente estudo teve como objetivo calibrar um conjunto de modelos hidrológicos para simular a resposta de bacias hidrográficas localizadas na densamente povoada região metropolitana de Lisboa e fornecer informação relevante que permita tornar o SVARH mais eficaz, passando a emitir alertas antecipados mais credíveis. No decurso do estudo foi possível avaliar a validade das curvas de vazão que suportam os hidrogramas observados e reproduzidos no processo de simulação e analisar diferentes métodos de avaliação da distribuição espacial da precipitação, com diferentes combinações de estações udográficas.

Considerando o estado de desenvolvimento atual do SVARH, este estudo permitirá que este sistema integre mais modelos hidrológicos de previsão, devidamente sustentados nos melhores hidrogramas unitários adaptados às diferentes bacias hidrográficas da zona metropolitana de Lisboa e incorpore informação sobre a distribuição espacial da precipitação mesmo em caso de ausência de registo udográfico (situação frequente face às interrupções na operação de recolha e manutenção da rede de monitorização de recursos hídricos geridos pela Autoridade Nacional da Água).

A médio prazo, será conveniente promover um estudo sobre a previsão da propagação temporal dos fenómenos meteorológicos monitorizados pelos radares meteorológicos e aplicar as informações relevantes do presente estudo a sistemas de aviso de cheias existentes ou a desenvolver associados a outras zonas geográficas não abrangidas pelo atual SVARH. Considera-se também relevante testar outros intervalos de tempo de dados de base, nomeadamente inferiores ao utilizado (horário).

Os métodos de análise desenvolvidos poderão também ser aplicados aos outros dois radares meteorológicos em funcionamento em Portugal (Cavalos do Caldeirão, em Loulé, e Cabeço do Pico do Gralheiro, em Arouca) instalados em 2005 e 2015, respetivamente.

Apesar das significativas melhorias tecnológicas ocorridas ao longo dos anos (eletrónicas e de processamento e análise de dados), que conduzem a melhorias na precisão da monitorização através do radar meteorológico, existem fatores de difícil eliminação, que não são apenas controlados pela melhoria tecnológica, que têm impedido a obtenção de melhores ajustamentos. Por exemplo, condições meteorológicas não detetadas pelo feixe do radar (camada atmosférica monitorizada), ocorrência de alvos estranhos que interferem com as medições e que poderão estar a condicionar a obtenção de melhores relações $U - R$.

O estudo das relações $Z - R$ a partir de dados de refletividade e de CAPPI ou de PCAAPI, para altitudes mais próximas da superfície, poderão melhorar as estimativas associadas ao radar de Cruz do Leão. O estudo das relações $Z - R$ deverá ser continuado através da análise de mais períodos chuvosos e a inclusão de dados de outros radares meteorológicos nacionais e, eventualmente, considerar um limite mínimo para realizar o ajustamento das relações $U - R$. A prossecução deste estudo poderá permitir melhorar a avaliação da relação entre as intensidades de precipitação e sustentar, caso justificável, a incorporação dos erros.

Os resultados da aplicação do hidrograma unitário sintético aplicável à região, sendo satisfatórios, decorrem de um número limitado de bacias hidrográficas e, por isso, a aplicação dos resultados obtidos em outras situações deverá ser avaliada criteriosamente.

Em conclusão: foram obtidas indicações relevantes para determinar a distribuição espaço-temporal da precipitação, as precipitações úteis e os hidrogramas unitários visando uma simulação hidrológica mais fiável, permitindo um alerta e aviso de caudais cheias com maior antevisão e mais assertivo e um melhor dimensionamento de obras hidráulicas. Deste modo, o estudo contribui para a diminuição da vulnerabilidade e a redução do risco de cheias.

BIBLIOGRAFIA

- Almeida, A.B. (2011). *Gestão da água: Incertezas e Riscos. Conceptualização Operacional*. Coleção Água, Ciência e Sociedade. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH). Esfera do Caos Editores. ISBN 978- 989- 680- 044- 4. Lisboa.
- Almeida, M.V., França, G.B. (2002). Estimativa de precipitação via radar para a região metropolitana da cidade do rio de Janeiro, XII – Congresso Brasileiro de Meteorologia. *Anais dos Congressos Brasileiros de Meteorologia*. Foz de Iguaçu-PR. Brasil.
- Alves, C.C.S.A. (2011). *Métodos de medições de caudais. Análise e comparação de diversos métodos hidrométricos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior de Agronomia (ISA). Universidade Técnica de Lisboa (UTL). Lisboa.
- Amorim, R.C.F., Ribeiro, A., Leite, C.C., Leal, B.G. e Silva, J.G.B. (2006). Avaliação de dois métodos de especialização da precipitação pluvial para o estado de Alagoas. Edição XIV – Congresso Brasileiro de Meteorologia. *Anais dos Congressos Brasileiros de Meteorologia*. Florianópolis. Brasil.
- Anagnostou, E.N., Morales, C.A. e Calheiros, R.V. (2000). Calibration of ground weather radar systems from TRMM precipitation radar observations; application to the S-Band radar in Bauru, XI – Congresso Brasileiro de Meteorologia. *Anais dos Congressos Brasileiros de Meteorologia*. Rio de Janeiro. Brasil.
- Antonio, M.A. (1996). Calibração de medidas de radar – Projecto Camera. IX – Congresso Brasileiro de Meteorologia. *Anais dos Congressos Brasileiros de Meteorologia*. Campos do Jordão. Brasil.
- Antonio, M.A. (2000). Medidas de chuva com radar e disdrômetro, XI – Congresso Brasileiro de Meteorologia. *Anais dos Congressos Brasileiros de Meteorologia*. Rio de Janeiro. Brasil.
- Barbosa, S. (1991). *Summary on radar-raingauge adjustment techniques, Paper 1.9. Advances in Radar Hydrology*. International Workshop, 11 a 13, Lisboa. Portugal.
- Battan, L.J. (1973). *Radar observation of the atmosphere*. University of Chicago Press. Chicago.
- Beneti, C. Calvetti, L. e Pereira Filho, A.J. (2002). Estimativa da precipitação por radar e pluviômetros na Região Metropolitana de Curitiba – Resultados Preliminares. *XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Foz do Iguaçu- PR. Brasil.
- Boorman, D.B. e Reed, D.W. (1981). Derivation of the catchment average unit hydrograph. *Institute of Hydrology*. Report nº 71.
- Brandes, E.A. (1975). Optimizing rainfall estimates with the air of radar. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 14, P. 1339-1345. oct.
- Calheiros, R.V. (1984). Mínimo sinal detectável em hidrologia com radar: uma avaliação. Instituto de Pesquisas Meteorológicas. Fundação Educacional de Bauru. III – Congresso Brasileiro de Meteorologia. *Anais dos Congressos Brasileiros de Meteorologia*. Belo Horizonte. Brasil.

- Calheiros, R.V. e Zawadzki, I. (1987). Reflectivity-rain rate relationships for Radar Hydrology in Brazil. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. American Meteorological Society. Vol. Nº 26. P. 118-132.
- Calvetti, L., Beneti, C. e Pereira Filho, A.J. (2003). Integração do radar meteorológico doppler do SIMEPAR e uma rede de pluviômetros para a estimativa da precipitação. *Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Belo Horizonte, Brasil INPE, P. 1137-1144.
- Cardoso, J.C., Bessa, M.P. Marado, M.B. (1973). *Cartas dos Solos de Portugal* (1:1 000 000).
- Chapra, S.C. e Canale, R.P. (1985). *Numerical methods for engineers. With personal computer applications*. McGraw-Hill Book Company. ISBN 0-07-010664-9.
- Chilson, P. (2008). Z-R relationships. Weather Radar Applications. University of Oklahoma. Document: ECE Electrical/Computer Engineering /METR-Meteorology 5683.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Edition. Civil Engineering Series. ISBN 0-07-010810-2.
- Chumchean, S., Seed, A. e Sharma, A. (2006). Correcting of real- time radar rainfall bias using a Kalman filtering approach. ELSEVIER. *Journal of Hydrology* 317. P. 123-137.
- Chumchean, S., Sharma, A. e Seed, A. (2004). Correcting of real- time radar rainfall bias using a Kalman filtering approach. *International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar*, 6. Melbourne. Australia.
- Ciach, G.J., Krajewski, W. F., Anagnostou, E.N., Baeck, M.L., Smith, J.A., McCollum, J.R. e Kruger, A. (1997). Radar Rainfall Estimation for Ground Validation Studies of the tropical Rainfall Measuring Mission. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 36, Nº 6, P. 735-747.
- Cluckie, I.D. e Collier, C.G. (1991). *Hydrological applications of weather radar*. Ellis Horwood Series in Environmental Management, Science and Tecnology. Ellis Horwood Limited. England.
- Collier, C.G. (1989). *Applications of weather radar systems, a guide to uses of radar data in meteorology and hydrology*. Ellis Horwood Series in Space Science and Space Tecnology. Ellis Horwood Library of Space Science and Space Tecnology.
- Conde, R.P. e Yamamoto, J.K. (1996). Avaliação de reservas por métodos computacionais: um estudo de caso na mina de Canoas 2 (PR). *Revista Brasileira de Geociências*. Volume N.º 26 (I): pp. 35-42. Brasil.
- CORINE Land Cover. 2006. *Mapa da Ocupação e Uso do solo de Portugal Continental*. <http://www.igeo.pt/produtos/CEGIG/Corine.htm>
- Correia, F.N. (1983). *Métodos de Análise e Determinação de Caudais de Cheia*. Tese para concurso de Investigador Auxiliar do LNEC. Ministério das obras Públicas. Lisboa. Portugal.
- Correia, F.N. (1984a). *Proposta de um Método para a Determinação de Caudais de Cheia em Pequenas Bacias Naturais e Urbanas*. Informação Técnica Hidráulica (ITH 7). Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa. Portugal.

- Correia, F.N. (1984b). *Alguns Procedimentos Adoptados pelo Soil Conservation Service para o Estudo do Impacto da Urbanização nos Caudais de Cheia*. Informação Técnica Hidráulica (ITH 7). Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa. Portugal.
- Costa T.V.S. (2008). *Detecção de Plumas de Incêndio com Radar Meteorológico*. Mestrado em Ciências Geofísicas. Faculdade de Ciências. Universidade de Lisboa (UL).
- Costa, P.C. (1983). O Método Racional Generalizado. Princípios Conceptuais, Domínio de Aplicação e Resultados. Seminário 290 - *Contribuição para o estudo de Drenagem de Águas Pluviais em Zonas Urbanas*, organizado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa.
- Crosson, L.W., Duchon, C.E., Raghavan, R. e Goodman, S.J. (1996). Assessment of rainfall estimates using a standart Z-R relationship and Probability matching method applied to composite radar data in Central Florida. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 35. P. 1203-1219, aug.
- David, J.S. (1976). *Drenagem de estradas, caminhos de ferro e aeródromos. Estudo hidrológico. Determinação de caudais de ponta de cheia em pequenas bacias hidrográficas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Serviço de Hidráulica, Divisão de Hidráulica Fluvial. Lisboa.
- Dervos, N., Baltas, E.A., Mimikou, M.A. (2006). Rainfall-Runoff Simulation in Experimental Basin Using Gis Methods. *Journal of Environmental Hydrology*.
- Farias, J.F.S. (2009). *Previsão de chuva a curtíssimo prazo na área de abrangência do radar meteorológico de São Paulo*. Dissertação de mestrado em Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. Brasil.
- Figueiredo, J.C. e Martins, D. (2007). Pluviometria para a região central do estado de São Paulo utilizando ecos de radar meteorológico. *Revista Energia na Agricultura*. Vol. Nº 22. Nº 4. P. 79-97. ISSN 1808-8759.
- Fournier, J.D. (1999). *Reflectivity-rainfall relationships in operational meteorology*. National Weather Service. Tallahassee, FL Weather Forecast Office. www.srh.noaa.gov.
- Fragoso, M. (1996). A utilização das imagens de radar meteorológico em climatologia. *Finisterra*, XXXI, 61, P. 29-42.
- Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D., Miller, D.A. e O' Bannon, T. (1998). The WSR-88D Rainfall algorithm. *Weather and Forecasting*. Vol. Nº 13. P. 377-395.
- Gonçalves, F.M., Barros, M.T.L. e Palos, J.C. (2006). Utilização de radar meteorológico em hidrologia. Fundação Aplicações de Tecnologias Críticas (ATECH). *Anais dos Congressos Brasileiros de Meteorologia*. Florianópolis. Brasil.
- Hawkins, R.H., T.J. Ward, D.E. Woodward e J.A. Van Mulen (2009). *Curve Number Hydrology. State of the practice*. American Society of Civil Engineers.
- HEC-HMS (2000). *Hydrologic Modeling System – Technical Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. March.

- HEC-HMS (2010). *Hydrologic Modeling System – User’s Manual*. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Versão 3.5. Aug.
- HEC-RAS (2010). *River Analysis System – User’s Manual*. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Versão 4.1. CPD-68. Jan.
- Hipólito, J.R. (1985). *NWSIST: Um sistema de simulação contínua de processos hidrológicos*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa (UTL). Instituto Superior Técnico (IST). Lisboa.
- Hipólito, J. R., Macedo, M. E., Rodrigues, A. e Saramago, M. (1995). Real-time flood warning system for the Alenquer river basin. III International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar. São Paulo. Brasil.
- Hipólito, J.R, e Vaz, A.C. (2011). *Hidrologia e recursos hídricos*. Coleção ensino da ciência e da tecnologia. 1ª Edição. IST Press. ISBN 978-972-8469-86-3.
- Hoggan, D.H. (1989). *Computer – assisted floodplain hydrology & hydraulics*. Featuring the U. S. Army Corps of Engineers’ HEC-1 and HEC-2 software systems. McGraw-Hill Publishing Company.
- Huff, F.A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*. Vol. 3, nº 4. pp. 1007- 1019.
- Hunter, M.S. (1996). WSR-88D radar rainfall estimation: capabilities, limitations and potential improvements. *National Weather Digest*. Vol. 20, Nº 4, P. 26-38.
- Hutchinson, M.F. (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. *Paper presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney*. Australia.
- Hutchinson, M.F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, nº 106: 211-232.
- Jenson, S.K.J. e Domingue, J.O. (1988). *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 54, pp. 1593- 1600.
- Junior, B.S.G., Magalhães, I.A.L., Freitas, C.A.A. e Cecílio, R.A. (2012). Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). *Ambiência Guarapuava* (PR). Vol. 8, N.º 1, p. 61-71. ISSN 1808-0251.
- Lencastre, A. (1991). *Hidráulica Geral*. 2ª Edição. Coimbra. Portugal.
- Lencastre, A. e Franco, F.M. (1984). *Lições de Hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa (UNL). Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa. Portugal.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H. (1982), *Hydrology for engineers*. McGraw-Hill Book Company. International Student Edition.

- Liu, Y.B., Gebremeskel, S., Smedt, F., Hoffmann, L., Pfister, L. (2003). A diffuse transport approach for flow routing in Gis – based flood modeling. *Journal of Hydrology*.
- Lobo-Ferreira, J.P., Oliveira, M. Mendes e Ciabatti, P.C. (1995). *Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal*. Volume 1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- Macedo, M. E. (1996). *Aplicação do radar meteorológico na previsão de cheias*. Tese de Mestrado em Ciências Geofísicas (Meteorologia). Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Setembro. Portugal.
- Macedo, M. E. e Hipólito, J. R. (1997). Aviso de cheia em tempo real, baseado em tele-medição e radar. 3º SILUSBA – *Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*.
- Mantel, N. (1970). *Why stepdown Procedures in Variable Selection*. Technometrics. Vol 12. N.º 3. Pág. 621- 625 Aug.
- Massambani, O (-) – *Texto básico para a disciplina meteorologia com radar*. Capítulo 2. Departamento de Ciências Atmosféricas. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG. Universidade de São Paulo (USP). Brasil.
- Matias, P. (2006a). O ciclo hidrológico e sua modelação. *Texto de apoio às aulas de Hidrologia*. Departamento de Engenharia Rural. Instituto Superior de Agronomia (ISA).
- Matias, P. (2006b). *Obtenção de algumas características fisiográficas de bacias hidrográficas*. *Texto de apoio às aulas de Hidrologia*. Departamento de Engenharia Rural. Instituto Superior de Agronomia (ISA).
- Matias, P. (2012a). Relações Precipitação-Escoamento. Método do Hidrograma Unitário. *Texto de apoio às aulas de Hidrologia I*. Departamento de Engenharia Rural. Instituto Superior de Agronomia (ISA).
- Matias, P. (2012b). *Obtenção de algumas Características Fisiográficas de bacias Hidrográficas a partir do Modelo Digital do Terreno e Hidrografia, com ArcGis e ArcHydro Tools*. *Texto de apoio às aulas de Hidrologia I*. Departamento de Engenharia Rural. Instituto Superior de Agronomia (ISA).
- Matos, J.M.S. (1983). Métodos de Análise e Previsão de Caudais de Cheia. Reflexões sobre o Método racional, o Método Racional Generalizado e Aspectos do Método do Soil Conservation Service. Relatório nº 62/11/7639 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa.
- Maziero, E., Cruz, J.C., Pasilha, D., Baumhardt, E. (2009). Indicador Hidrológico de Tempo de percurso Determinado Pixel a Pixel para cada Bacia Hidrográfica. XVIII – *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- McCuen, R.H (1996). *Hydrologic Analysis and Design*. Prentice-Hall, Inc.. Upper Saddle River, New Jersey. EUA.
- Miranda, P. (2013). *Introdução à Meteorologia* - Universidade de Lisboa. Instituto Português do Mar e da Atmosfera (moodle.ciencias.ulisboa.pt/mod/resource/view.php?id=81733).
- Mishra, S.K. e V.P. Singh (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Springer Science + Business Media Dordrecht.

- Moore, R.J., May, B.C., Jones, D.A. e Black, K.B. (1991). *Local calibration of weather radar over London*. Institute of Hydrology. Wallingford. UK.
- Morales, C.A.R. (1991). *Distribuição de tamanho de gotas nos trópicos: ajuste de uma função gama e suas aplicações*. Dissertação de Mestrado. IAG. Universidade de São Paulo (USP). Brasil.
- Moreira, I.A. (2005). *Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidrológica. Curitiba. Brasil.
- Moreira, I.A., Mine, M.R.M., Pereira Filho, A.J., Beneti, C. e Calveti, L. (2006). Utilização de estimativas de precipitação por radar e pluviômetros em modelo hidrológico – Estudo Preliminar. Edição XIV – Congresso Brasileiro de Meteorologia. *Anais dos Congressos Brasileiros de Meteorologia*. Florianópolis. Brasil.
- Morel-Seytoux, H.J. (1987). *Engineering Hydrology, Ensemble of Lecture Notes and Class Handouts developed since 1977*. Hydrowar Reports Division. Hydrology Days Publications. Fort Collins.
- Nau (2017). *Fundamentals of Statistical Hydrology*. Fuqua School of Business. Duke University.
- Neves, E.M, Caldeira, L. e Pinheiro, A. (2015). *Projeto, construção e observação de pequenas barragens de aterro*. Coleção ensino da ciência e da tecnologia. 1ª Edição. IST Press. ISBN 978-989-8491-37-5.
- Nogueira, D.S., Lopes, M.N.G., Vieira, A.C., Oliveira, R.G.G. e Jesus, N.V.G. (2015). Estimativa de precipitação utilizando radar meteorológico banda S na Amazônia Oriental. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*. João Pessoa-PB. Brasil, 25 a 29 de abril. INPE.
- Paço, N.M.S. (2008). *Estabelecimento de hidrogramas unitários*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa (UTL). Instituto Superior Técnico (IST). Lisboa.
- Pallaoro, D.S., Camili, E.C., Guimarães, S.C. e Albuquerque, M.C.F. (2016). Métodos para o condicionamento fisiológico de sementes de milho/Methods for priming maize seeds. *Journal of Seed Science* vol. 38 nº. 2 Londrina April/June. P. 148-154. Print version ISSN 2317-1537. On-line version ISSN 2317-1545.
- Pereira, C.B. (1995). *As precipitações intensas*. Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos. Universidade Técnica de Lisboa (UTL). Instituto Superior Técnico (IST). Lisboa.
- Pereira e Filho, A.J. (1999). Mesoscale precipitation fields. Part I: Statistical Analysis and Hydrologic Response. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 38. P. 82-101.
- Pereira e Filho, A.J., Crawford, K.C. e Hartzell, C.L. (1998). Improving WSR-88D hourly rainfall estimates. *Weather and Forecasting*. American Meteorological Society. Vol. 13, P. 1016-1028.
- Pfaff, S. e Jacobson, C. (1998). Performance of the tropical Z/R relationship during the October 8-11, 1997 South Texas flood event. NWSO Corpus Christi. SR/SSD 98-32. 8-1-98.
- Ponce, V.M. (1989). *Engineering Hydrology. Principles and Practices*. Prentice-Hall, Inc.
- Quiang Dai, Dawei Han e Rico-Ramirez, M.A. (2013). Empirically modelling radar quantitative precipitation estimation uncertainty for C-band radar in the United Kingdom. *Proceedings of IAHR World Congress*.

- Raghavan, S. (2003). *Radar Meteorology*. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. ISBN 1-4020-1604-2.
- Rodrigues, A. (1995). Real-time Implementation of Very Short Period Precipitation Forecasting System for the Lisbon Weather Radar. *III International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar*. São Paulo. Brasil. Agosto.
- Rodrigues, M.T., Monte, B., Fialho, W.M. B., Diniz, M.A., Carlos de Amorim, R.F., Silva Junior, R.S. e Fragoso Junior, C.R. (2011). Utilização de métodos de interpolação para análise espacial pluviométrica na bacia hidrográfica do Paraíba do Meio – Alagoas e Pernambuco. *IV – Simpósio Internacional de Climatologia*. João Pessoa – PB. Outubro. Brasil.
- Santos, M. e Fragoso, M. (2010). Modelação espacial do índice de concentração diária de precipitação em Portugal Continental. *VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física. II – Seminário Ibero-Americano de Geografia Física*. Universidade de Coimbra. Maio. Portugal.
- Saramago, M. (1995). Adjustment of the Lisbon Weather Radar over the Alenquer Basin. *III International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar*. São Paulo. Brasil. Agosto.
- Schröder D. (2007). Tutorial 2: ArcGIS Tools for Hydrology – Hydrological Analysis of a Watershed. GIS – *Short course in Application of GIS in water resources?*. Hochschule für Technik. Stuttgart.
- SCS (1972). *National Engineering Handbook (NEH)*, Section 4, Hydrology. United States Department of Agriculture (USDA). Versão Agosto. EUA.
- SCS (1973). *A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds*. SCS-TP-149.
- Shaw, E. M. (1983). *Hydrology in Practice*. Van Nostrand Reinhold (UK) co. Ltd. Berkshire. Inglaterra. ISBN 0 - 442.30566-4.
- Singh, V.P. (1975). Studies on rainfall-runoff modeling. Estimation of mean areal rainfall. Partial Technical Completion Report. Project N.º 3109-206. *New Mexico Water Resources Research Institute - WRRI Report N.º 061*. November. EUA.
- Singh, V.P. (1989). *Hydrologic Systems. Volume II - Watershed Modeling*. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey 07632. EUA.
- Tallaksen, L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *J. Hydrol.* 165: 349-370.
- Temez, J. (1987). *Calculo Hidrometeorologico de Caudales Maximos em Pequenas cuencas naturales*. MOPU. Madrid. España.
- Temez, J. (1978). *Calculo Hidrometeorologico de Caudales Maximos em Pequenas cuencas naturales*. MOPU. Madrid. España.
- USDA (2007). *National Engineering Handbook (NEH)*, Part 630 Hydrology. Chapter 16, Hydrographs. United States Department of Agriculture (USDA). March. EUA.

- Usul, N. e Yilmaz, M. (2002). Estimation of instantaneous unit hydrograph with Clark's technique in GIS, online paper - <http://gis.esri.com/library/userconf/proc02/pap1229/p1229.htm>.
- Van der Sande, C.J., Jong, S.M., Roo, A.P.J. (2003). A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4. Elsevier Science. Pág. 217-229.
- Viessman, W.Jr. e Lewis, G.L. (1996). *Introduction to Hydrology*. 4ª Edition. HarperCollins College publishers. New York. EUA. ISBN 0-673-99165-2.
- Viola, M.R., Mello, C.R., Pinto, D.B.F., Mello, J.M. e Ávila, L.F. (2010). Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* (online). Vol. 14, N.º 9, p. 970-978. ISSN 1807-1929.
- WMO (2008, 2010). *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. World Meteorological Organization – WMO, N° 8.

PORTAIS CONSULTADOS

Capítulo 1 e 2

<http://www.mohid.com/>
<http://www.emdat.be>
<http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>
<http://snirh.pt>
<http://www.igeo.pt/produtos/CEGIG/Corine.htm>

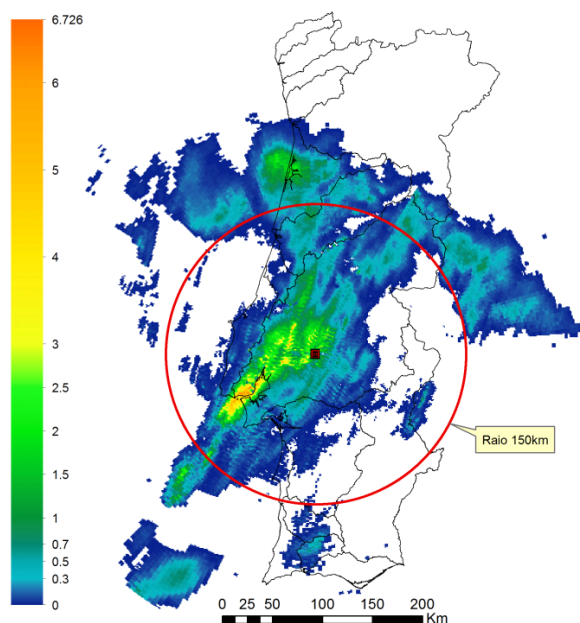
Capítulo 3

<http://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>, que substitui <http://www.cptec.inpe.br>
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Radar>
<http://sites.google.com/site/radarpy5aal/>
<http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Radar>
<http://www.ipma.pt/pt/educativa/>
<http://knol.google.com/k/stephane-jourdan/the-doppler-effect-s-contribution-in/3dfvm2oyvur0n/11#> (Knol has been discontinued as of May 1, 2012))
<http://www.vaisala.com/en/products/weatherradars/IRIS/Pages/IRIS.aspx>
ftp://ftp.sigmet.com/outgoing/manuals/IRIS_Programmers_Manual.pdf
http://eumetnet.eu/wp-content/themes/aeron-child/observations-programme/current-activities/opera/database/OPERA_Database/index.html
<https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/radar>

Capítulo 4

<http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>
<http://sniamb.apambiente.pt/Home/Default.htm>
<http://www.real-statistics.com>
<http://wak2.web.rice.edu/>
<https://people.duke.edu/~rnau/411home.htm>

Intensidade de precipitação (mm/h)
18 de Fevereiro 2008 03:00



CONTRIBUIÇÃO PARA A PREVISÃO DE CHEIAS E PARA A DIMINUIÇÃO DA
VULNERABILIDADE E RISCO. APLICAÇÃO NA ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA

CLÁUDIA CRISTINA LEAL BRANDÃO PEREIRA PINHEIRO

ORIENTADOR: Professor Associado Paulo Guilherme Martins de Melo Matias

ANEXOS
TESE ELABORADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DO
AMBIENTE

2018

Índice de Anexos

ANEXO 1 – PORTEFÓLIO DE FOTOGRAFIAS DAS ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO DA AUTORIDADE NACIONAL DA ÁGUA:	2
ANEXO 1.1. - ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS.	2
ANEXO 1.2 – ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS.	11
ANEXO 6 – ESQUIÇO DAS SEÇÕES DE SEIS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS: QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA, PONTE PINHAL E COLARES (PAULO FERNANDES, DESENHADOR DO INAG).	16
ANEXO 13 - VALORES DOS PARÂMETROS QUE DEFINEM O HIDROGRAMA UNITÁRIO SINTÉTICO PARA AS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS, SEGUNDO TEMEZ E MOCKUS (SCS TRIANGULAR).	19
ANEXO 14 - CONFRONTAÇÃO, PARA AS SETE BACIAS HIDROGRÁFICAS EM ANÁLISE, ENTRE AS REDES HIDROGRÁFICAS RESULTANTE DO MET COM CÉLULA DE 80 M X 80 M, OBTIDA A PARTIR DO SRTM, E DA CARTOGRAFIA DO INSTITUTO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO (REDE HIDROGRÁFICA GEOCODIFICADA DA APA, BASEADA NA ESCALA 1:25 000).	20
ANEXO 15 - CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS MÉDIAS DOS HIDROGRAMAS TOTAIS: CAUDAL DE PONTA DE CHEIA Q_p ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), CAUDAL DE BASE NO INSTANTE T_0 , Q_{b0} ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), CAUDAL DE INÍCIO DE RECESSÃO, Q_r ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), COEFICIENTE DE ESCOAMENTO, C_e , CONSTANTES DE EXAURIMENTO, α (h^{-1}) E TEMPO DE BASE, T_b (H), RELATIVOS ÀS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS ANALISADAS DE QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL, PARA CADA ACONTECIMENTO ANALISADO.	21
ANEXO 16 - CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DOS HIDROGRAMAS DE ESCOAMENTO DIRETO: NÚMERO DE ESCOAMENTO, N (INICIAL E CALIBRADO), PERDAS INICIAIS, I_a (MM), ÍNDICE Φ (MM), ARMAZENAMENTO OU RETENÇÃO POTENCIAL MÁXIMA DE ÁGUA NO SOLO, S (MM), TEMPO PARA A PONTA, T_p (H), TEMPO DE ATRASO (T_i) E TEMPO DE CONCENTRAÇÃO, T_c (H); ASSOCIADOS A CADA ACONTECIMENTO ANALISADO, PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS EM QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL.	23
ANEXO 17 – MAPAS DE ISÓCRONAS E RESPECTIVOS DIAGRAMAS TEMPO-ÁREA, ASSOCIADOS AOS QUATRO MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE ISÓCRONAS, PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DEFINIDAS EM QUINTA DAS CAMILAS, ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL, LAVEIRAS, SENHORA DA ROCHA E PONTE PINHAL.	25

Anexo 1 – Portefólio de fotografias das estações de monitorização da Autoridade Nacional da Água:
Anexo 1.1. - Estações meteorológicas.

Cheleiros



Sem data



Sem data



1/04/2005



1/04/2005



8/04/2009



6/03/2012



6/03/2012



6/03/2012

Cascais



Sem data



14/02/2012



14/02/2012

Cascais



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012

Sobral da Abelheira



Sem data



6/03/2012



6/03/2012

Milharado



Sem data (estava errado-
Calhandriz)



19/10/2006 (estava errado-
Calhandriz)



19/10/2006 (estava errado-
Calhandriz)

Milharado



13/03/2012



13/03/2012



13/03/2012

Linhó



Sem data



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012



28/02/2012



28/02/2012

Cacém



28/02/2012



28/02/2012



28/02/2012



28/02/2012



28/02/2012

Caneças



6/03/2012



6/03/2012



6/03/2012

Caneças



6/03/2012



6/03/2012



6/03/2012

Malveira da Serra



28/02/2012



28/02/2012



28/02/2012



28/02/2012



28/02/2012



28/02/2012

Barragem Rio da Mula



28/02/2012



28/02/2012



28/02/2012

Lousa



6/03/2012



6/03/2012



6/03/2012



6/03/2012



6/03/2012

Arranhó



13/03/2012



13/03/2012



13/03/2012

Calhandriz



13/03/2012



13/03/2012



13/03/2012



13/03/2012



13/03/2012



13/03/2012

Vila Nogueira de Azeitão



13/03/2012



13/03/2012



13/03/2012

Monte da Caparica



13/03/2012



13/03/2012



13/03/2012



13/03/2012



24/05/2005



24/05/2005

São Julião do Tojal



6/03/2012



6/03/2012



6/03/2012



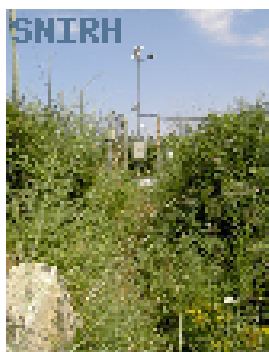
6/03/2012



6/03/2012



6/03/2012



2/07/2009



7/08/2009



7/08/2009

Anexo 1.2 – Estações hidrométricas.

Ponte Pinhal



Senhora da Rocha



Laveiras



20/02/2002



7/06/2006



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012

Quinta das Camilas



Sem data



5/08/2004



6/04/2005

Quinta das Camilas



23/10/2007



23/10/2007



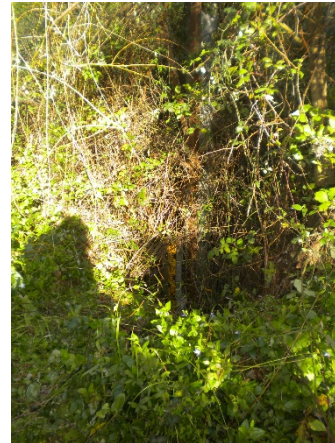
23/10/2007



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012

Ponte Zambujal



1/01/1980



17/06/2005



17/06/2005

Estação Agronómica Nacional



23/10/2007



23/10/2007



11/04/2008

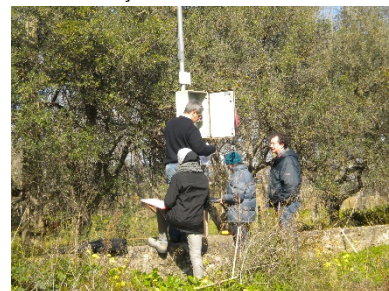
Estação Agronómica Nacional



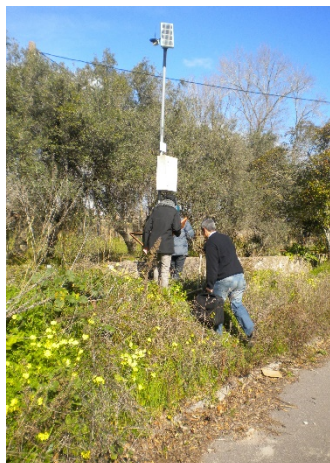
11/04/2008



11/04/2008



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012



14/02/2012

Colares



9/04/2009



9/04/2009



28/02/2012

Colares



28/02/2012

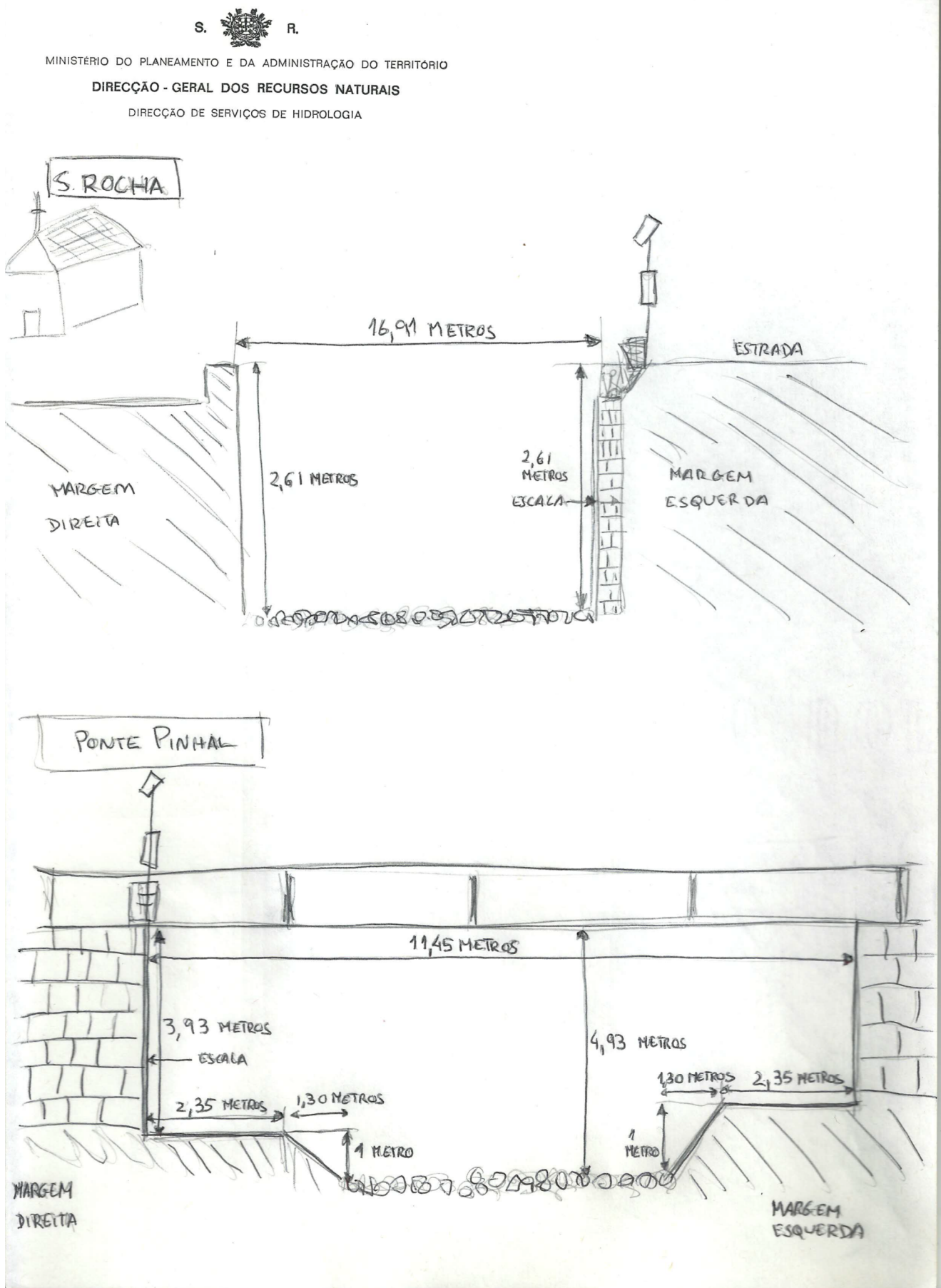


28/02/2012



28/02/2012

Anexo 6 – Esqueto das seções de seis estações hidrométricas: Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha, Ponte Pinhal e Colares (Paulo Fernandes, desenhador do INAG).

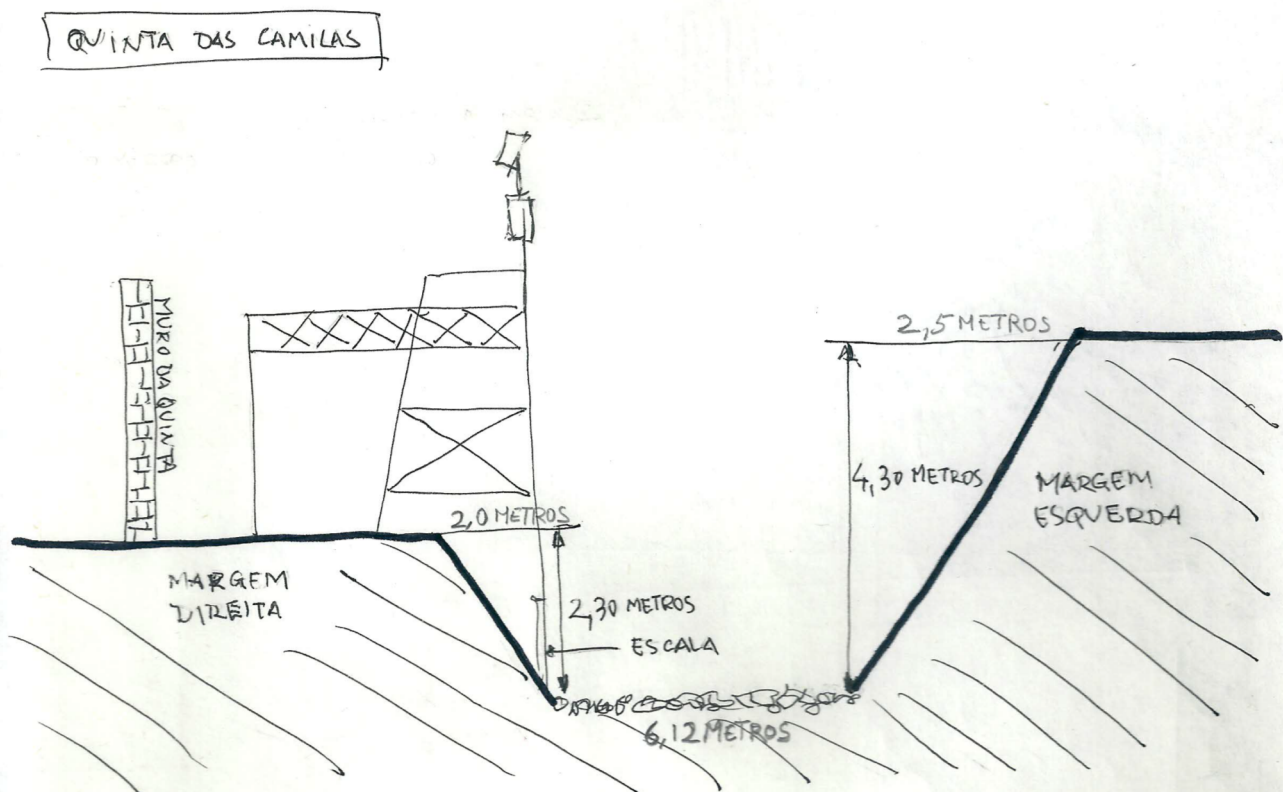
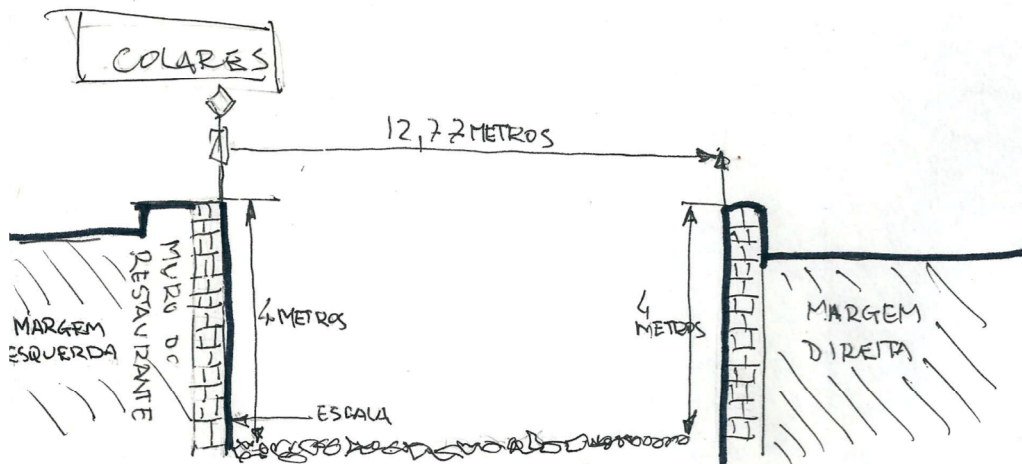




MINISTÉRIO DO PLANEAMENTO E DA ADMINISTRAÇÃO DO TERRITÓRIO

DIRECÇÃO - GERAL DOS RECURSOS NATURAIS

DIRECÇÃO DE SERVIÇOS DE HIDROLOGIA



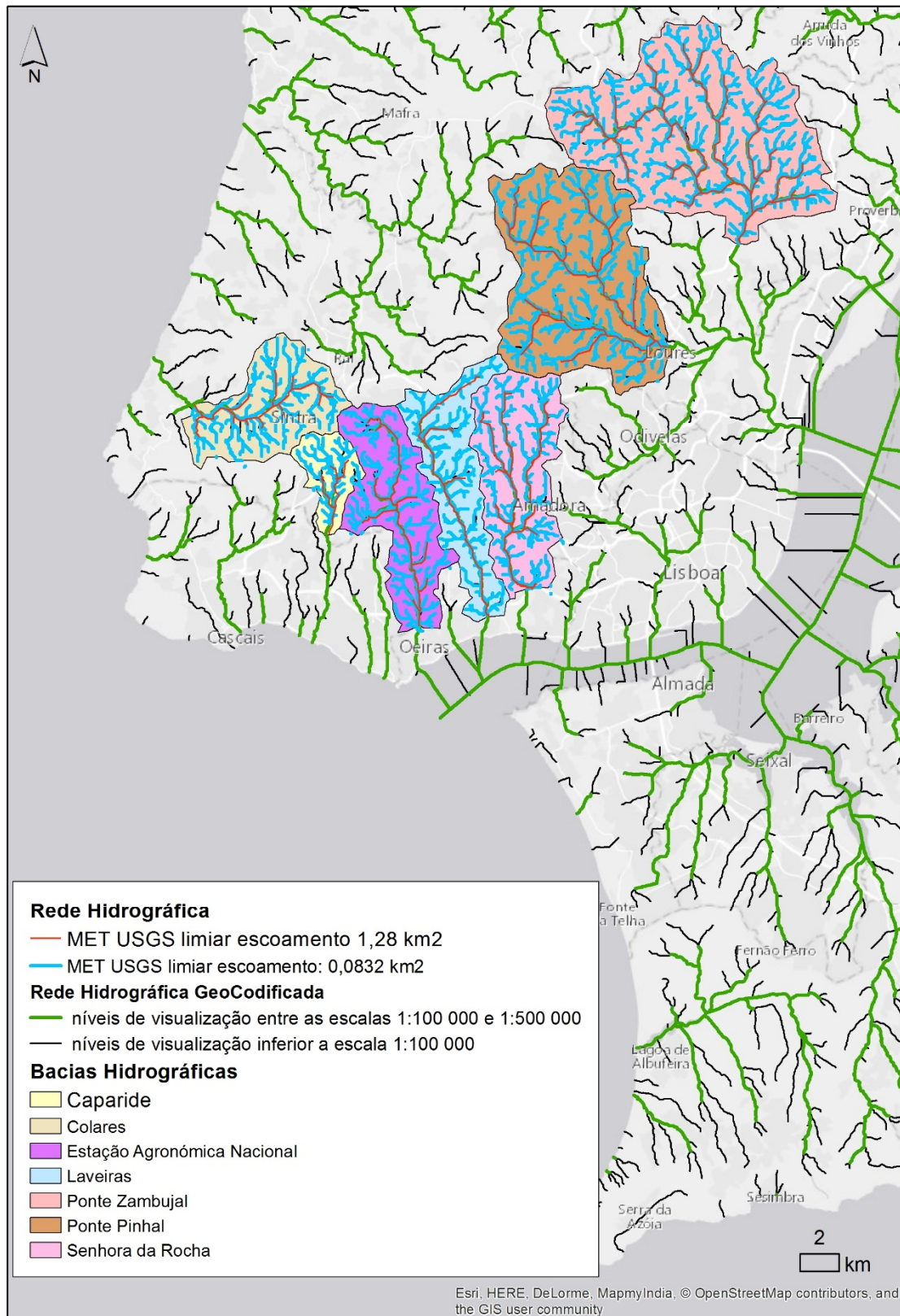
Anexo 13 - Valores dos parâmetros que definem o hidrograma unitário sintético para as sete bacias hidrográficas, segundo Temez e Mockus (SCS triangular).

Hidrograma unitário sintético TEMEZ								
Quinta das Camilas			Estação Agronómica Nacional		Laveiras		Senhora da Rocha	
D (h)	0,495		D (h)	1,110	D (h)	1,192	D (h)	0,951
A (km ²)	10,406		A (km ²)	37,542	A (km ²)	33,203	A (km ²)	41,357
t _c (h)	2,47		t _c (h)	5,55	t _c (h)	5,96	t _c (h)	4,76
Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)		Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)	Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)	Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)
t ₀ (h)	0	0	0	0	0	0	0	0
t _p (h)	1,11	1,95	2,50	3,13	2,68	2,58	2,14	4,02
t _b (h)	2,97	0	6,66	0	7,15	0	5,71	0
Hidrograma unitário sintético Mockus*								
Quinta das Camilas			Estação Agronómica Nacional		Laveiras		Senhora da Rocha	
D (h)	0,21		D (h)	0,42	D (h)	0,49	D (h)	0,40
A (km ²)	10,41		A (km ²)	37,54	A (km ²)	33,203	A (km ²)	41,36
t _i (h)	0,95		t _i (h)	1,87	t _i (h)	2,20	t _i (h)	1,79
t _c (h)	1,58		t _c (h)	3,12	t _c (h)	3,66	t _c (h)	2,98
Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)		Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)	Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)	Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)
t ₀ (h)	0	0	0	0	0	0	0	0
t _p (h)	1,06	2,05	2,08	3,75	2,44	2,83	1,99	4,33
t _b (h)	2,82	0	5,56	0	6,52	0	5,31	0

Hidrograma unitário sintético TEMEZ						
Ponte Zambujal		Ponte Pinhal		Colares		
D (h)	1,475	D (h)	1,105	D (h)	0,794	
A (km ²)	99,059	A (km ²)	77,626	A (km ²)	32,282	
t _c (h)	7,37	t _c (h)	5,53	t _c (h)	3,97	
Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)	Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)	Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)	
t ₀ (h)	0	0	0	0	0	0
t _p (h)	3,32	6,22	2,49	6,50	1,79	3,76
t _b (h)	8,85	0	6,63	0	4,76	0
Hidrograma unitário sintético Mockus*						
Ponte Zambujal		Ponte Pinhal		Colares		
D (h)	0,40	D (h)	0,38	D (h)	0,33	
A (km ²)	99,06	A (km ²)	77,626	A (km ²)	32,28	
t _i (h)	1,79	t _i (h)	1,71	t _i (h)	1,47	
t _c (h)	2,98	t _c (h)	2,85	t _c (h)	2,45	
Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)	Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)	Tempo (h)	q _p (m ³ s ⁻¹)	
t ₀ (h)	0	0	0	0	0	0
t _p (h)	1,99	10,36	1,90	8,51	1,64	4,10
t _b (h)	5,31	0	5,06	0	4,37	0

Nota: * Considerando o número de escoamento com AMC_{III}, condições mais próximas dos acontecimentos hidrometeorológicos observados e simulados.

Anexo 14 - Confrontação, para as sete bacias hidrográficas em análise, entre as redes hidrográficas resultante do MET com célula de 80 m x 80 m, obtida a partir do SRTM, e da cartografia do Instituto Geográfico do Exército (rede hidrográfica Geocodificada da APA, baseada na escala 1:25 000).



Anexo 15 - Características hidrológicas médias dos hidrogramas totais: caudal de ponta de cheia Q_p ($m^3 s^{-1}$), caudal de base no instante t_0 , Q_{b0} ($m^3 s^{-1}$), caudal de início de recessão, Q_r ($m^3 s^{-1}$), coeficiente de escoamento, C_e , constantes de exaurimento, α (h^{-1}) e tempo de base, t_b (h), relativos às estações hidrométricas analisadas de Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal, para cada acontecimento analisado.

Acontecimento hidrometeorológico	Q _p (m³ s ⁻¹)	Q _{b0} (m³ s ⁻¹)	Q _r (m³ s ⁻¹)	C _e (-)	α (h ⁻¹)	t _b (h)
Quinta das Camilas						
18/fev/08	4,22	0,04	0,38	0,26	0,047	34
16/nov/06	12,15	2,81	4,53	0,75	0,020	20
24/nov/06	18,72	4,53	8,23	0,71	0,043	21
27/nov/06	12,53	3,62	5,62	0,69	0,024	12
16/out/06	3,69	1,87	2,04	0,21	0,005	28
18/out/06	6,34	1,87	2,15	0,39	0,018	12
20/out/06	15,90	2,15	3,48	0,65	0,041	20
22/out/06	11,53	2,62	4,29	0,62	0,041	5
23/out/06	20,44	3,14	5,62	0,70	0,033	8
25/out/06	13,83	2,62	8,97	0,69	0,046	14
26/out/06	9,76	3,55	5,71	0,69	0,043	10
03/nov/05	2,74	0,43	0,49	0,17	0,021	18
20/nov/05	5,27	0,13	0,96	0,20	0,074	27
21/nov/05	1,38	0,64	0,61	0,17	0,085	10
01/out/03	Caudais inferiores a 1,0 m³ s ⁻¹					
12/out/03						
25/out/03	2,32	0,02	0,20	0,16	0,061	32
27/out/03	Caudais inferiores a 1,0 m³ s ⁻¹					
31/out/03						
Estação Agronómica Nacional						
18/fev/08	60,92	0,17	2,77	0,31	0,047	34
16/nov/06	20,34	1,04	2,61	0,44	0,014	23
24/nov/06	31,96	4,65	4,24	0,45	0,011	33
27/nov/06	23,67	4,04	4,65	0,54	0,012	18
16/out/06	11,23	0,17	1,61	0,43	0,069	30
18/out/06	13,85	0,67	2,61	0,44	0,057	11
20/out/06	30,84	1,74	3,47	0,44	0,042	19
22/out/06	28,68	2,77	4,65	0,52	0,057	10
23/out/06	34,65	3,47	4,24	0,46	0,029	13
25/out/06	34,26	2,77	4,65	0,61	0,015	28
26/out/06	12,94	4,04	4,24	0,34	0,014	16
03/nov/05	22,42	0,59	1,87	0,52	0,026	26
20/nov/05	Qp=39 m³ s ⁻¹ mas com escoamento muito superior à precipitação (coeficiente de escoamento superior a 1)					
21/nov/05	Qp=13 m³ s ⁻¹ mas com escoamento muito superior à precipitação (coeficiente de escoamento superior a 1)					
01/out/03	Qp= 7 m³ s ⁻¹ mas com escoamento muito superior à precipitação (coeficiente de escoamento superior a 1)					
02/out/03	10,83	0,3245607	2,30	0,90	0,155	8
12/out/03	7,73	0,38	2,15	0,82	0,138	9
25/out/03	Qp= 24,95 m³ s ⁻¹ mas com escoamento muito superior à precipitação (coeficiente de escoamento superior a 1)					
27/out/03	7,56	1,37	1,49	0,30	0,011	41
31/out/03	18,93	1,04	1,74	0,39	0,029	38
Laveiras						
18/fev/08	101,23	0,84	4,55	0,57	0,048	28
16/nov/06	10,72	0,01	0,36	0,28	0,036	28
24/nov/06	23,40	0,84	0,71	0,69	0,016	39
27/nov/06	16,08	0,98	1,12	0,86	0,024	20
16/out/06	3,82	0,07	0,25	0,10	0,274	8
18/out/06	6,13	0,00	0,07	0,19	0,001	11
20/out/06	16,08	0,07	0,25	0,28	0,135	19
22/out/06	22,12	0,07	0,47	0,37	0,067	28
23/out/06						
25/out/06	18,42	0,15	0,84	0,44	0,081	23
26/out/06	5,72	0,47	0,59	0,25	0,041	19
03/nov/05	Caudais inferiores a 1,0 m³ s ⁻¹					
20/nov/05						
21/nov/05						
01/out/03	6,55	0,36	0,47	0,68	0,043	31
02/out/03	11,22	0,36	0,71	0,97	0,090	13
12/out/03	7,87	0,15	0,15	0,72	0,020	16
25/out/03	23,40	0,15	3,15	0,96	0,074	29
27/out/03	10,72	1,90	1,62	0,41	0,019	31
31/out/03	19,63	1,26	2,49	0,77	0,029	29

Senhora da Rocha						
18/fev/08	87,93	0,03	0,32	0,41	0,10	35
16/nov/06	Caudais inferiores a 1,02 m³ s⁻¹ e coeficiente de escoamento inferior a 0,04					
24/nov/06	5,46	0,01	0,03	0,11	0,27	22
27/nov/06	6,41	0,00	0,24	0,38	0,93	8
16/out/06	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹					
18/out/06	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹					
20/out/06	3,52	0,00	0,00	0,047	0,00	10
22/out/06	7,89	0,00	0,00	0,09	0,00	9
23/out/06	Caudais inferiores a 1,83 m³ s⁻¹ e coeficiente de escoamento inferior a 0,04					
25/out/06	2,85	0,00	0,01	0,050	0,78	17
26/out/06	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹					
03/nov/05	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹					
20/nov/05	Caudais inferiores a 1,74 m³ s⁻¹ e coeficiente de escoamento inferior a 0,04					
21/nov/05	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹					
01/out/03	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹					
12/out/03						
25/out/03						
27/out/03						
31/out/03						
Ponte Zambujal	Sem hidrogramas					
Ponte Pinhal						
18/fev/08	103,92	0,56	8,18	0,51	0,0006	39
16/nov/06	21,39	0,09	1,37	0,22	0,0280	36
24/nov/06	90,53	15,81	6,13	0,57	0,0255	37
27/nov/06	28,81	3,8	1,71	0,49	0,0217	44
16/out/06	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹					
18/out/06	Caudais inferiores a 1,99 m³ s⁻¹ e coeficiente de escoamento inferior a 0,04					
20/out/06	14,80	0,02	0,17	0,10	0,0297	40
22/out/06	10,87	0,79	1,21	0,07	0,0000	16
23/out/06	10,69	1,21	0,99	0,12	0,0608	13
25/out/06	54,61	0,40	2,72	0,35	0,0247	29
26/out/06	21,84	2,29	2,61	0,27	0,0484	28
03/nov/05	15,79	0,11	0,36	0,15	0,0743	32
20/nov/05	45,65	0,79	6,46	0,51	0,0000	34
21/nov/05	20,49	6,29	7,71	0,44	0,0962	11
01/out/03	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹					
02/out/03	Caudais inferiores a 2,94 m³ s⁻¹ e coeficiente de escoamento inferior a 0,04					
12/out/03	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹					
25/out/03	12,69	0,03	0,61	0,15	0,0763	29
27/out/03	5,50	0,67	1,37	0,11	0,0824	21
31/out/03	13,25	0,1401606	1,53	0,28	0,0599	28
Colares	Não foi possível determinar caudais					

Nota: Não foram seleccionados para análise hidrológica os acontecimentos hidrometeorológicos que apresentam as seguintes características:

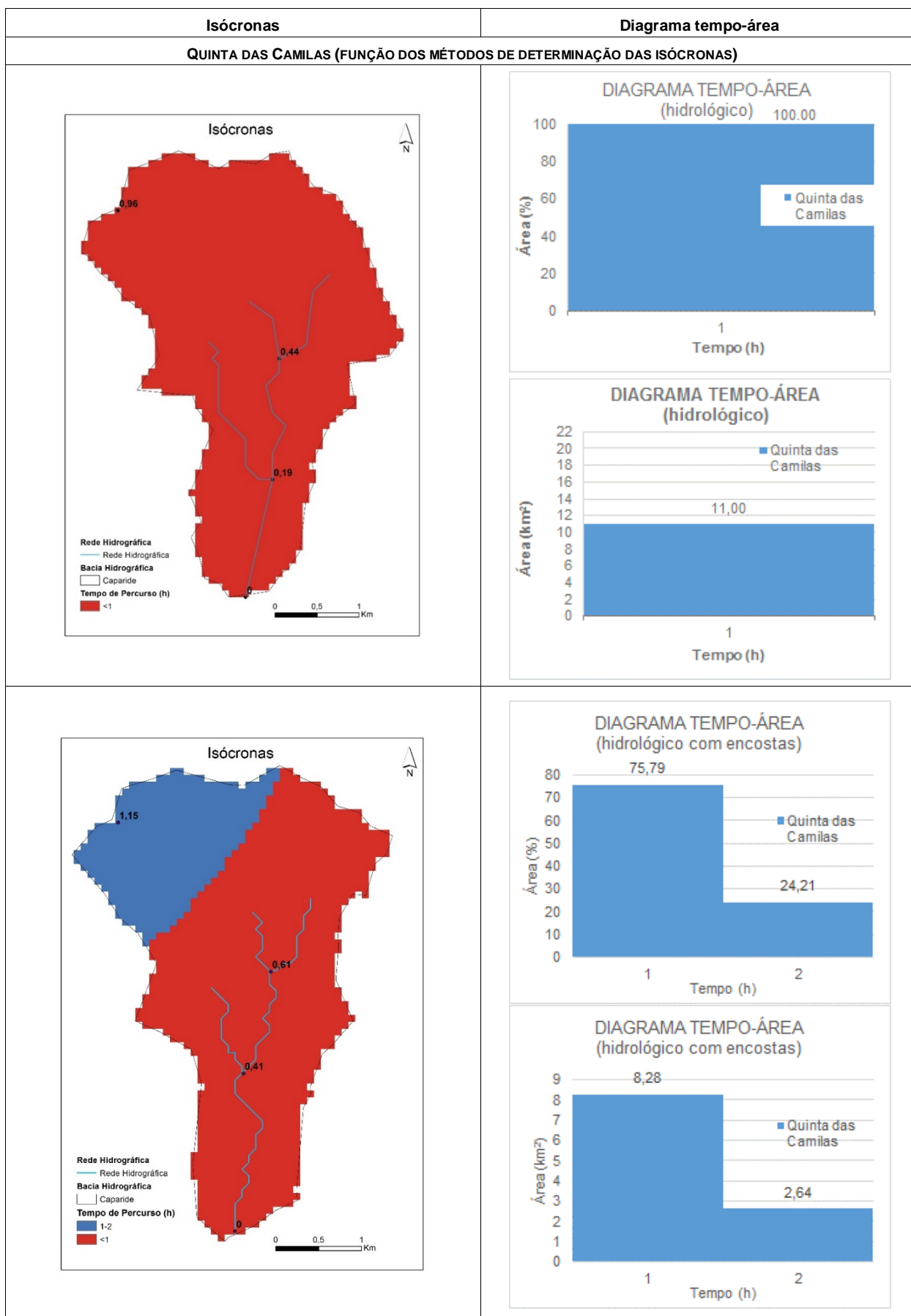
- Hidrograma com caudais inferiores a $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$;
- Hidrogramas aos quais estão associados coeficientes de escoamento inferiores a 0,04;
- Hidrogramas aos quais estão associados coeficientes de escoamento superiores a 1.

Anexo 16 - Características hidrológicas dos hidrogramas de escoamento direto: Número de Escoamento, N (inicial e calibrado), perdas iniciais, I_a (mm), Índice Φ (mm), armazenamento ou retenção potencial máxima de água no solo, S (mm), tempo para a ponta, T_p (h), tempo de atraso (t) e tempo de concentração, t_c (h); associados a cada acontecimento analisado, para as bacias hidrográficas definidas em Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.

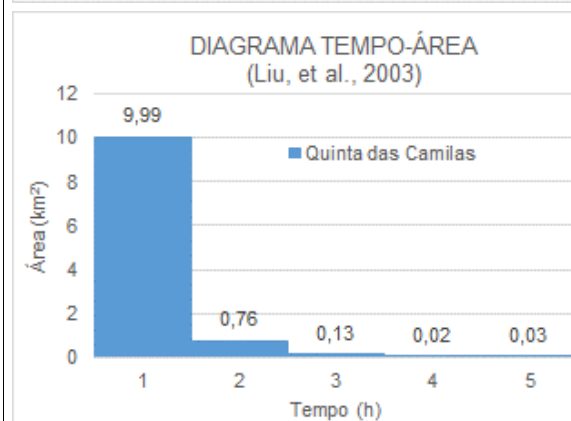
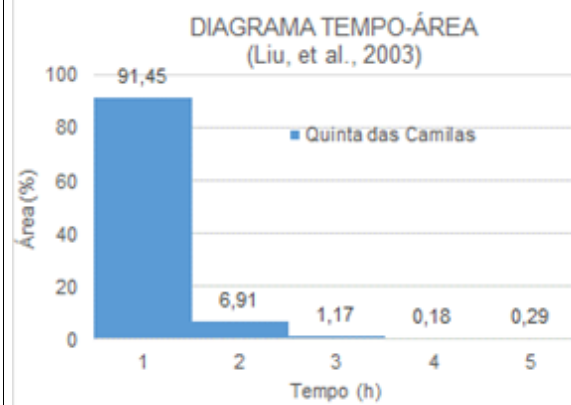
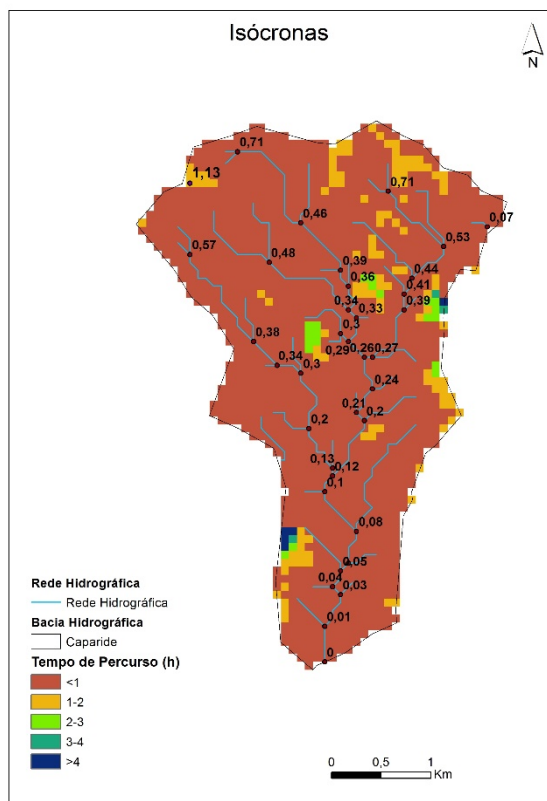
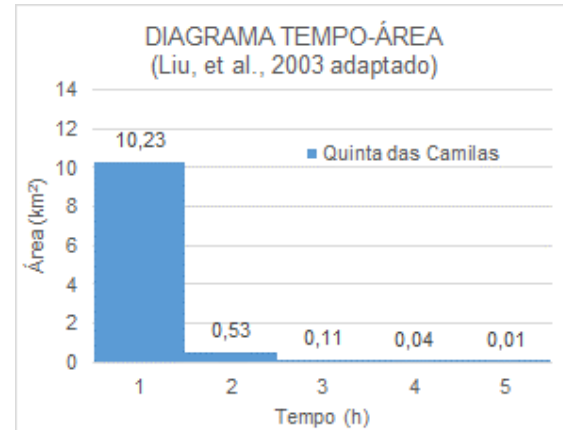
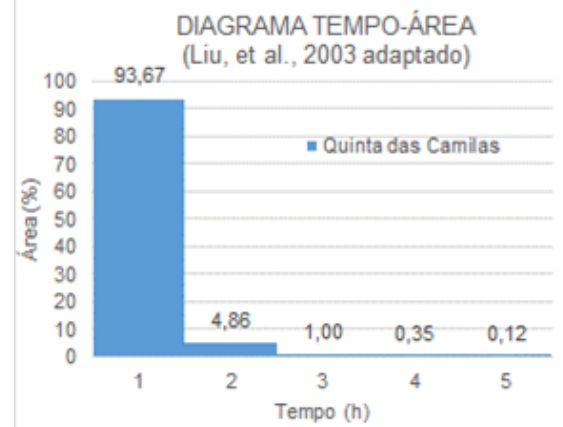
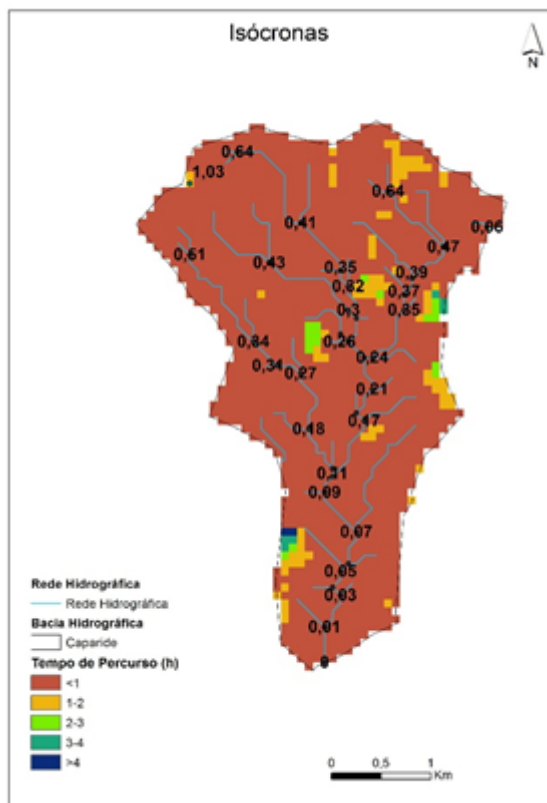
Acontecimento hidrometeorológico	N		I _a	Índice Φ	S	T _p	t		t _c	
	Inicial	Calibrado	(mm)	(mm h ⁻¹)	(mm)	(h)	(h)	(h)	(h)	
			SCS e Índice Φ	Índice Φ	SCS		SCS	Índice Φ	SCS	Índice Φ
Quinta das Camilas										
18/fev/08	81,99	67,17	1,80	2,45	124,16	18	3,67	5,67	11	16
16/nov/06	81,99	97,01	0,00	0,71	7,84	5	2,81	2,81	1	9
24/nov/06	81,99	96,57	2,50	0,458	9,01	16	2,00	2,00	2	4
27/nov/06	81,99	97,65	1,80	0,732	6,10	3	1,00	1,00	5	6
16/out/06	81,99	83,77	4,80	2,167	49,22	7	9,89	3,00	8	8
18/out/06	81,99	93,66	2,10	3,14	17,20	4	2,00	3,00	8	10
20/out/06	81,99	92,11	0,70	1,763	21,76	11	3,00	3,00	8	10
22/out/06	81,99	98,44	2,20	1,347	4,03	2	1,00	1,00	2	3
23/out/06	81,99	95,76	0,00	3,955	11,26	3	2,00	2,00	6	6
25/out/06	81,99	95,53	0,70	0,877	11,87	4	2,43	2,43	2	2
26/out/06	81,99	98,50	1,00	0,4659	3,87	6	3,00	3,00	0	0
03/nov/05	81,99	84,83	7,70	2,78	45,41	3	0,36	2,00	6	16
20/nov/05	81,99	56,94	3,60	5,55	192,11	13	0,29	0,29	2	15
21/nov/05	81,99	92,11	1,90	1,192	21,75	3	1,00	2,00	5	7
01/out/03	Caudais inferiores a 1,0 m³ s ⁻¹									
12/out/03										
25/out/03	81,99	64,56	2,00	2,982	139,43	6	6,20	8,20	6	26
27/out/03	Caudais inferiores a 1,0 m³ s ⁻¹									
31/out/03										
Estação Agronómica Nacional										
18/fev/08	85,12	49,75	1,71	6,14	256,55	20	1,88	1,88	9	11
16/nov/06	85,12	88,36	0,00	2,30	33,46	5	3,02	5,02	6	14
24/nov/06	85,12	89,08	4,36	1,10	31,13	15	2,00	2,00	5	18
27/nov/06	85,12	98,41	5,13	0,59	4,10	2	2,00	4,00	5	13
16/out/06	85,12	94,39	2,86	0,53	15,10	6	6,94	7,94	10	11
18/out/06	85,12	98,14	3,05	0,89	4,82	3	1,00	1,00	4	6
20/out/06	85,12	86,62	3,04	2,88	39,25	7	1,30	2,30	6	11
22/out/06	85,12	95,85	1,49	1,83	11,00	4	2,00	2,00	3	7
23/out/06	85,12	92,45	0,00	4,73	20,75	3	1,00	2,00	10	10
25/out/06	85,12	92,19	0,06	1,25	21,51	11	1,79	2,79	6	15
26/out/06	85,12	90,23	0,48	1,31	27,50	5	3,34	6,34	6	6
03/nov/05	85,12	95,26	3,37	0,78	12,63	9	1,00	2,00	8	17
20/nov/05	Qp=39 m³ s ⁻¹ mas com escoamento muito superior à precipitação (coeficiente de escoamento superior a 1)									
21/nov/05	Qp=13 m³ s ⁻¹ mas com escoamento muito superior à precipitação (coeficiente de escoamento superior a 1)									
01/out/03	Qp= 7 m³ s ⁻¹ mas com escoamento muito superior à precipitação (coeficiente de escoamento superior a 1)									
02/out/03	85,12	99,87	0,04	0,06	0,33	4	2,00	2,00	3	3
12/out/03	85,12	99,84	0,18	0,07	0,41	5	3,00	3,00	3	4
25/out/03	Qp= 24,95 m³ s ⁻¹ mas com escoamento muito superior à precipitação (coeficiente de escoamento superior a 1)									
27/out/03	85,12	84,16	0,84	0,65	47,82	14	7,00	10,00	7	7
31/out/03	85,12	89,85	0,70	0,53	28,69	7	9,94	16,94	5	18
Laveiras										
18/fev/08	78,62	75,40	2,41	3,34	82,86	14	2,29	3,29	9	11
16/nov/06	78,62	83,48	0,00	2,48	50,25	5	2,80	3,80	4	24
24/nov/06	78,62	97,95	2,61	0,19	5,31	15	1,00	6,00	2	10
27/nov/06	78,62	99,95	1,29	0,01	0,14	5	2,14	2,14	7	7
16/out/06	78,62	86,88	2,78	1,66	38,34	4	1,00	2,00	3	6
18/out/06	78,62	90,75	0,68	1,97	25,88	3	1,00	1,00	6	9
20/out/06	78,62	80,62	2,63	3,27	61,04	7	1,00	1,00	6	11
22/out/06	78,62	86,66	1,41	2,83	39,12	4	2,50	2,00	9	9
23/out/06										
25/out/06	78,62	88,75	1,19	2,06	32,19	12	2,07	3,07	7	12
26/out/06	78,62	90,20	2,18	1,36	27,58	3	3,00	10,00	7	9
03/nov/05	Caudais inferiores a 1,0 m³ s ⁻¹									
20/nov/05										
21/nov/05										
01/out/03	78,62	99,74	1,33	0,04	0,65	23	6,33	9,33	9	9
02/out/03	78,62	99,97	0,05	0,01	0,07	3	1,48	1,48	4	4
12/out/03	78,62	99,53	0,25	0,16	1,20	4	2,00	2,00	6	11
25/out/03	78,62	100,00	0,69	0,00	0,01	6	4,09	4,09	2	2
27/out/03	78,62	92,87	0,34	0,42	19,51	3	9,00	9,00	8	8
31/out/03	78,62	98,44	0,32	0,14	4,04	3	13,99	3,38	6	6

Senhora da Rocha										
18/fev/08	78,28	66,32	3,80	4,38	128,98	12	1,00	2,00	7	20
16/nov/06	Caudais inferiores a 1,02 m³ s⁻¹ e coeficiente de escoamento inferior a 0,04									
24/nov/06	78,28	79,77	2,42	0,79	64,42	13	1,00	1,00	2	10
27/nov/06	78,28	99,04	0,98	0,23	2,47	5	2,00	4,00	1	3
16/out/06	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹									
18/out/06	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹									
20/out/06	78,28	49,08	4,95	3,84	263,47	6	1,00	1,00	3	5
22/out/06	78,28	84,44	5,26	3,38	46,79	2	0,36	1,00	1	8
23/out/06	Caudais inferiores a 1,83 m³ s⁻¹ e coeficiente de escoamento inferior a 0,04									
25/out/06	78,28	54,72	7,09	3,24	210,16	9	1,00	4,00	3	11
26/out/06	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹									
03/nov/05	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹									
20/nov/05	Caudais inferiores a 1,74 m³ s⁻¹ e coeficiente de escoamento inferior a 0,04									
21/nov/05	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹									
01/out/03	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹									
12/out/03										
25/out/03										
27/out/03										
31/out/03										
Ponte Zambujal	Sem hidrogramas									
Ponte Pinhal										
18/fev/08	77,23	78,68	13,77	3,08	68,83	11	2,49	2,49	16	25
16/nov/06	77,23	63,08	0,00	4,99	148,66	6	3,59	5,59	12	25
24/nov/06	77,23	95,60	5,02	0,78	11,69	14	3,00	6,00	5	21
27/nov/06	77,23	96,65	3,84	0,52	8,81	3	2,00	5,00	3	38
16/out/06	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹									
18/out/06	Caudais inferiores a 1,99 m³ s⁻¹ e coeficiente de escoamento inferior a 0,04									
20/out/06	77,23	41,59	4,34	6,32	356,79	10	1,04	4,04	6	31
22/out/06	77,23	55,55	13,26	6,21	203,21	6	2,00	3,00	2	13
23/out/06	77,23	71,56	0,03	6,04	100,93	3	1,00	1,00	5	11
25/out/06	77,23	71,86	0,49	3,62	99,49	12	2,96	3,96	7	16
26/out/06	77,23	80,80	3,44	1,90	60,34	8	4,79	7,79	11	13
03/nov/05	77,23	74,16	8,72	4,15	88,52	5	2,00	3,00	5	29
20/nov/05	77,23	86,09	3,78	1,18	41,03	14	6,06	9,06	5	11
21/nov/05	77,23	99,31	2,16	0,47	1,76	3	2,98	2,98	5	6
01/out/03	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹									
02/out/03	Caudais inferiores a 2,94 m³ s⁻¹ e coeficiente de escoamento inferior a 0,04									
12/out/03	Caudais inferiores a 1,0 m³ s⁻¹									
25/out/03	77,23	68,39	7,46	3,88	117,39	6	2,47	6,47	5	26
27/out/03	77,23	84,25	5,29	1,55	47,50	11	4,21	4,21	7	14
31/out/03	77,23	81,09	0,12	2,01	59,22	6	8,92	10,62	4	19
Colares	Não foi possível determinar caudais									

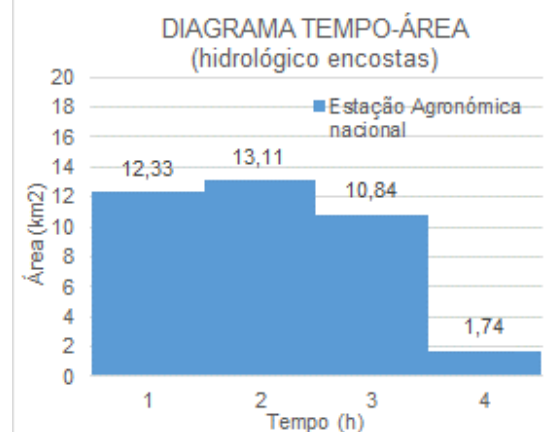
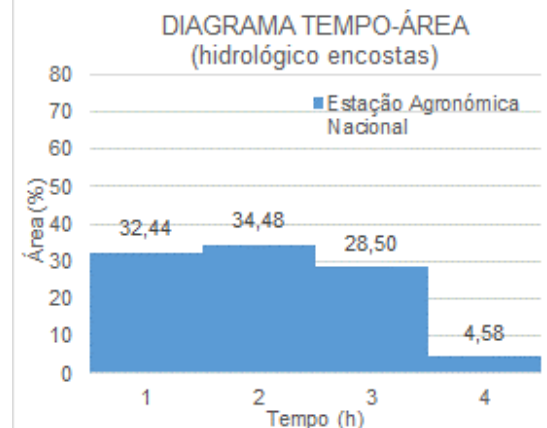
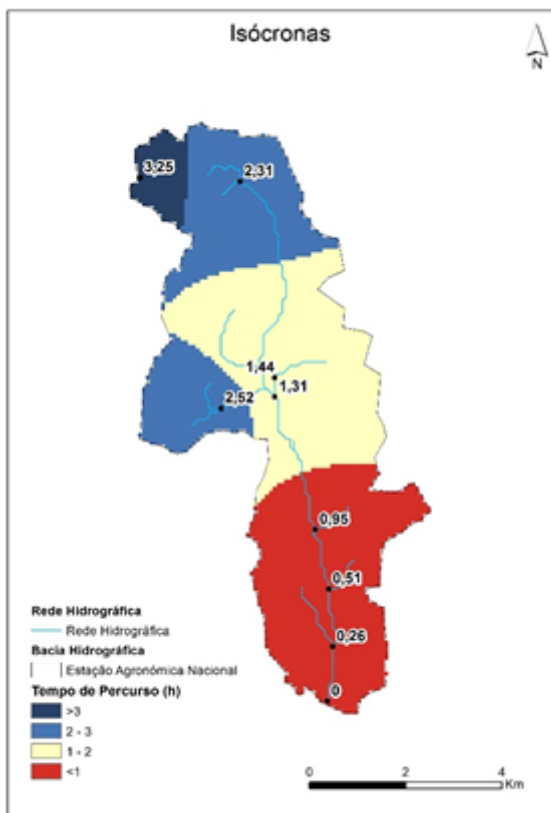
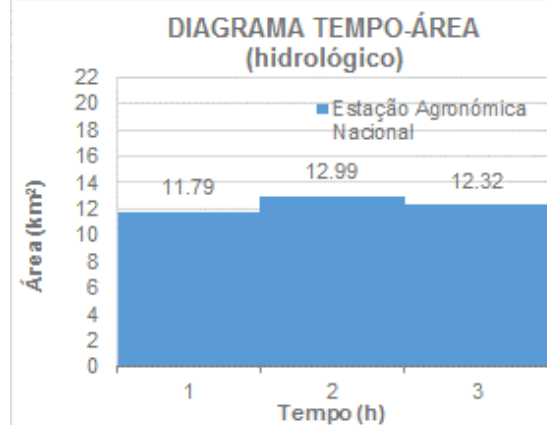
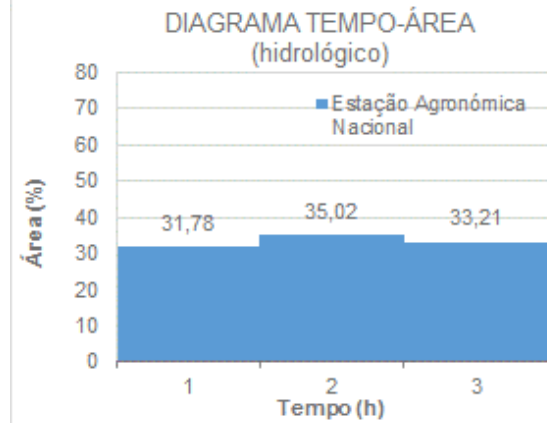
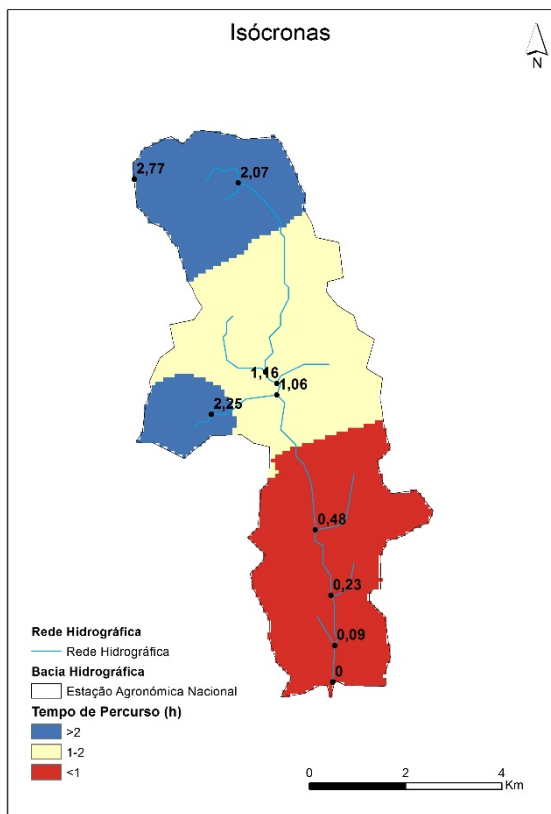
Anexo 17 – Mapas de isócronas e respetivos diagramas tempo-área, associados aos quatro métodos de determinação de isócronas, para as bacias hidrográficas definidas em Quinta das Camilas, Estação Agronómica Nacional, Laveiras, Senhora da Rocha e Ponte Pinhal.

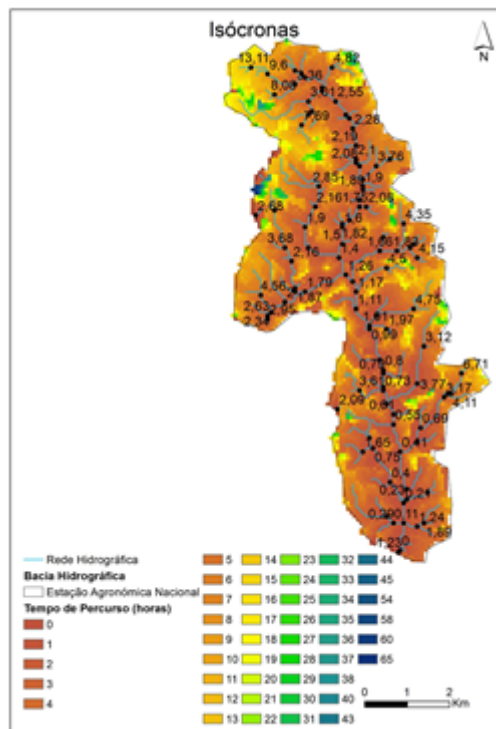


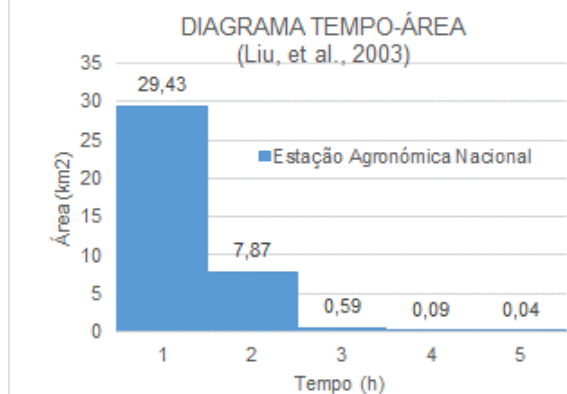
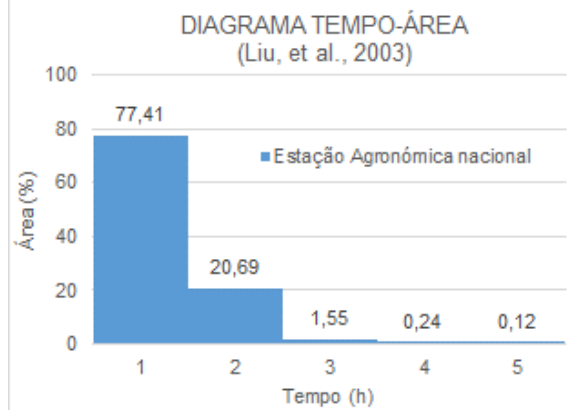
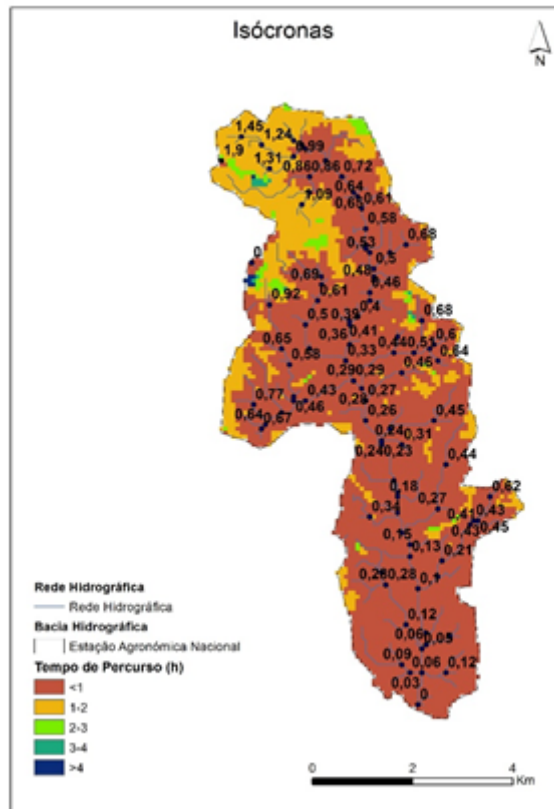
Não foi possível aplicar o método proposto por Usul e Yilmaz (2002)



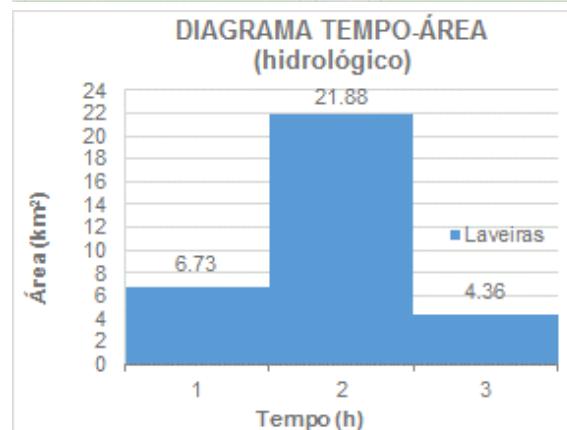
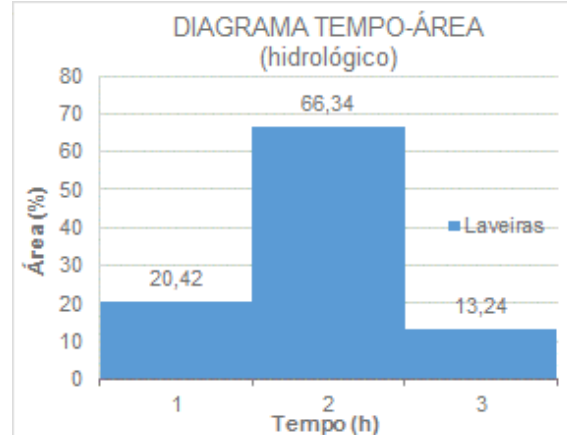
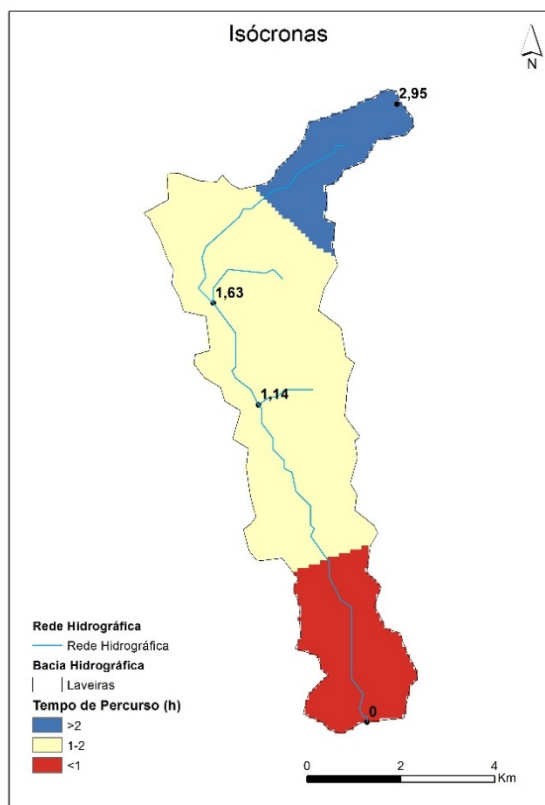
ESTAÇÃO AGRONÓMICA NACIONAL (FUNÇÃO DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS ISÓCRONAS)

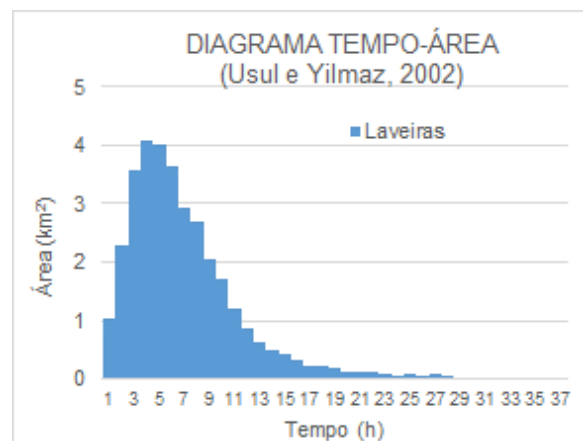
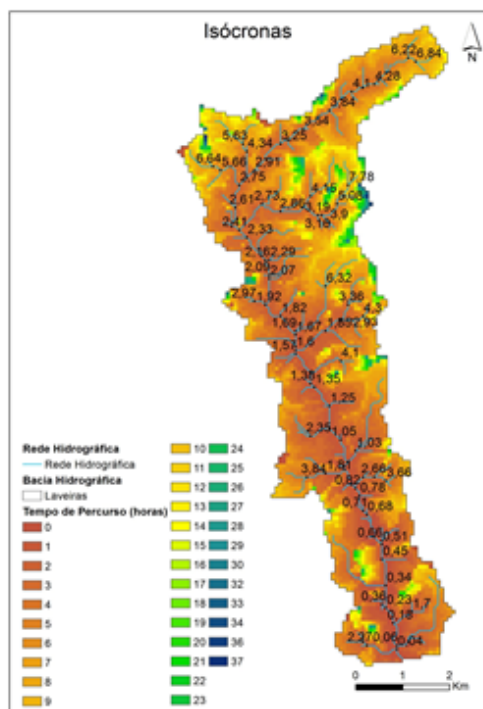
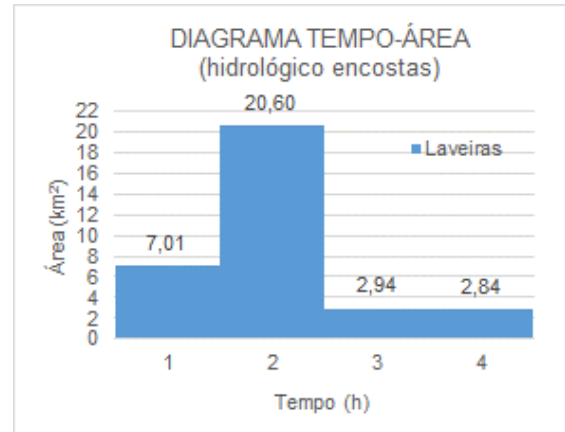
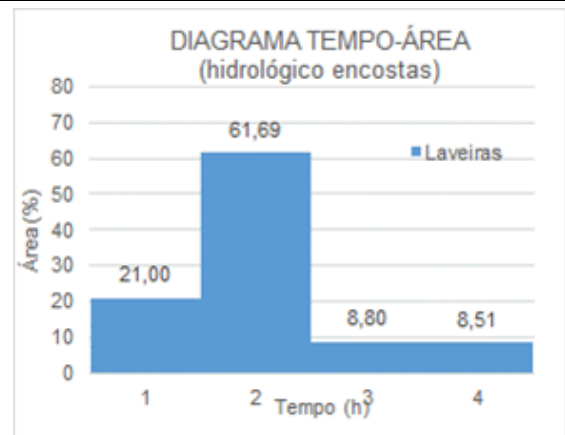
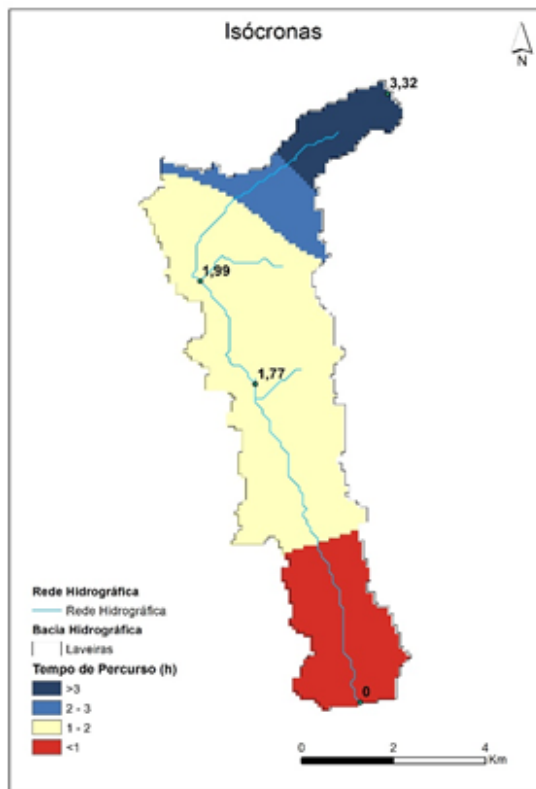


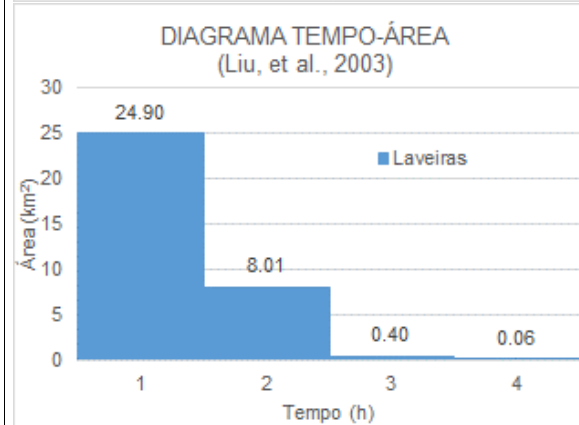
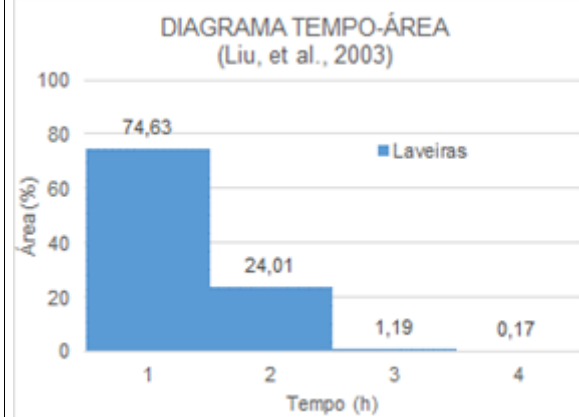
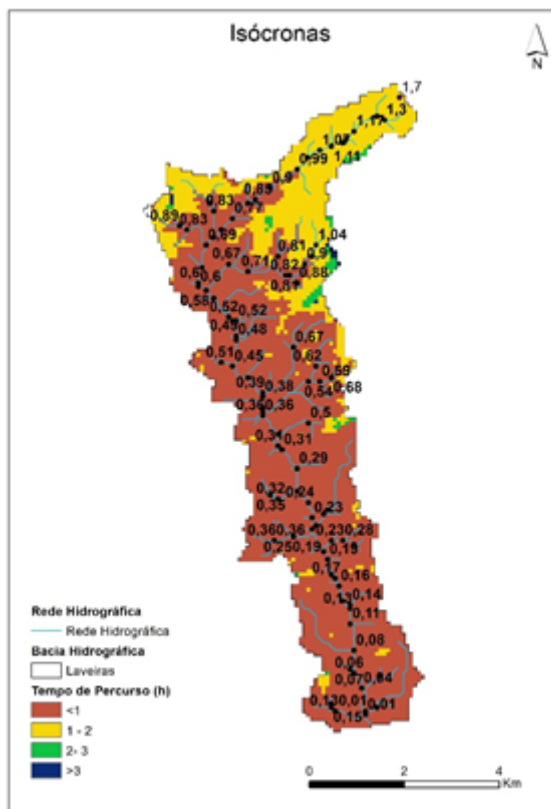
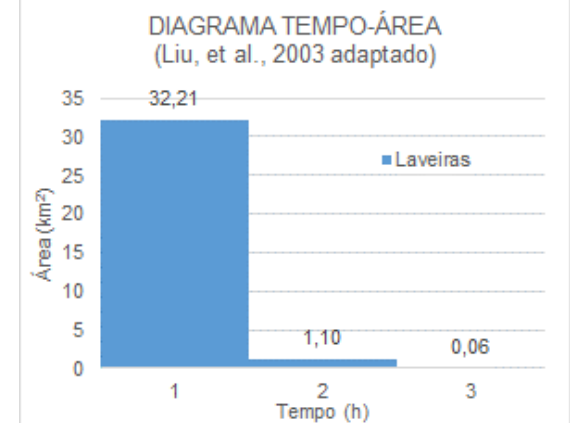
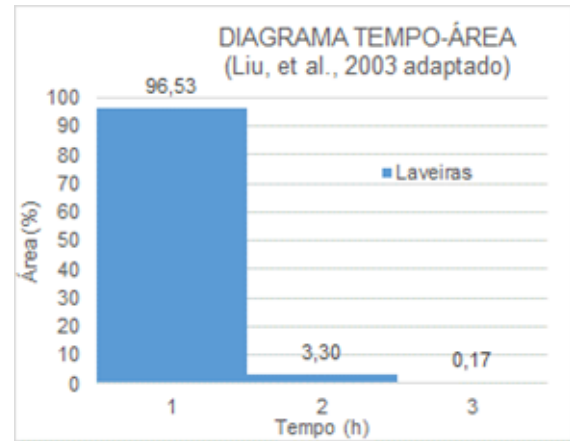
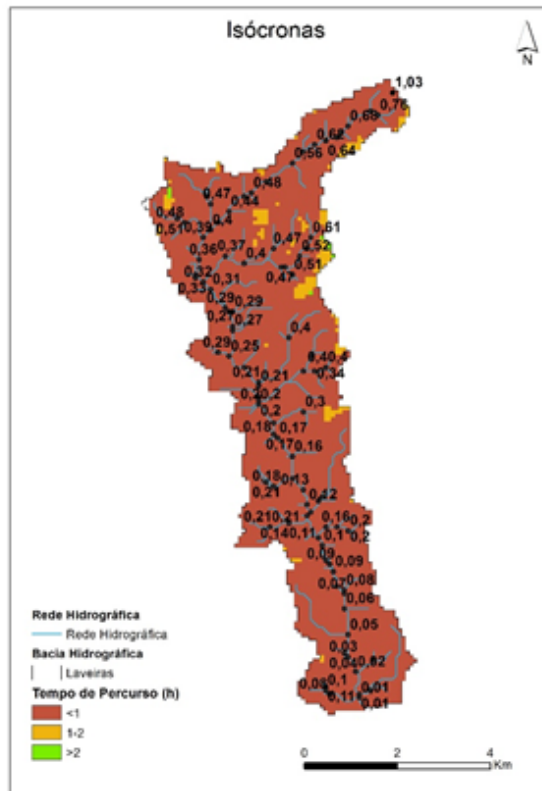




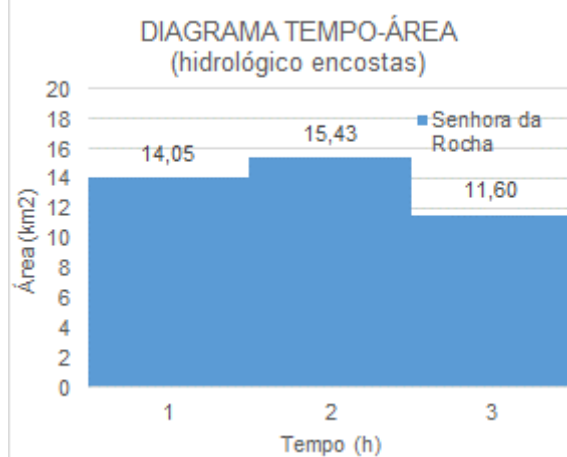
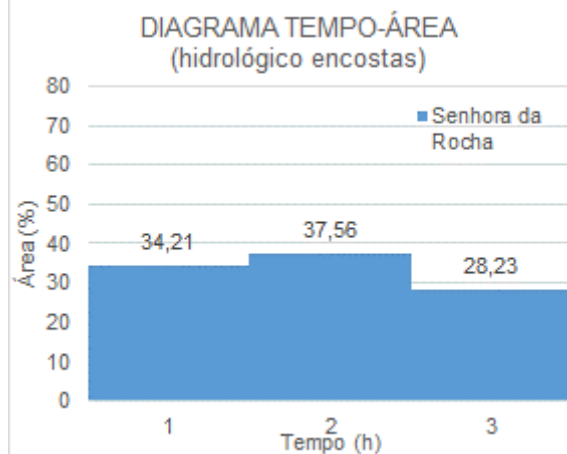
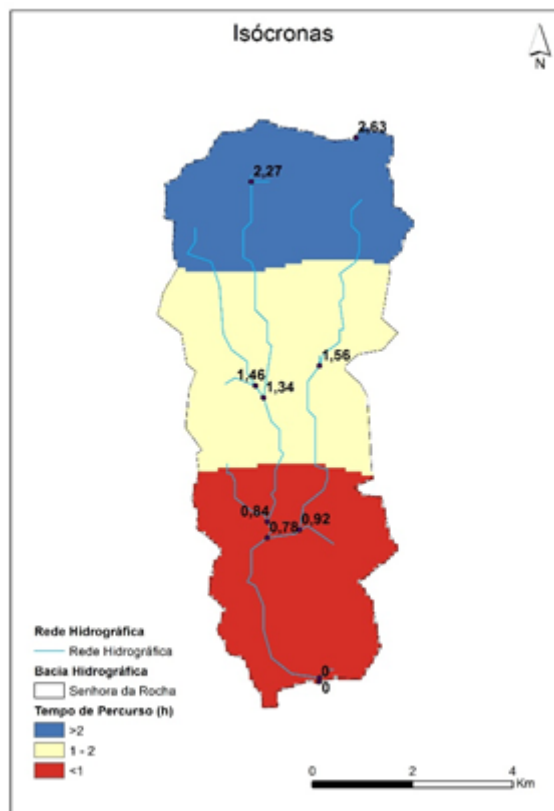
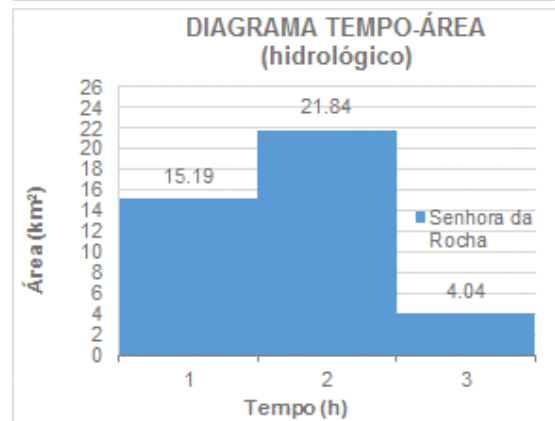
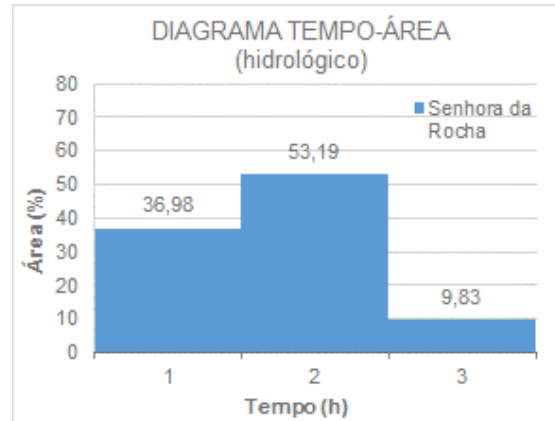
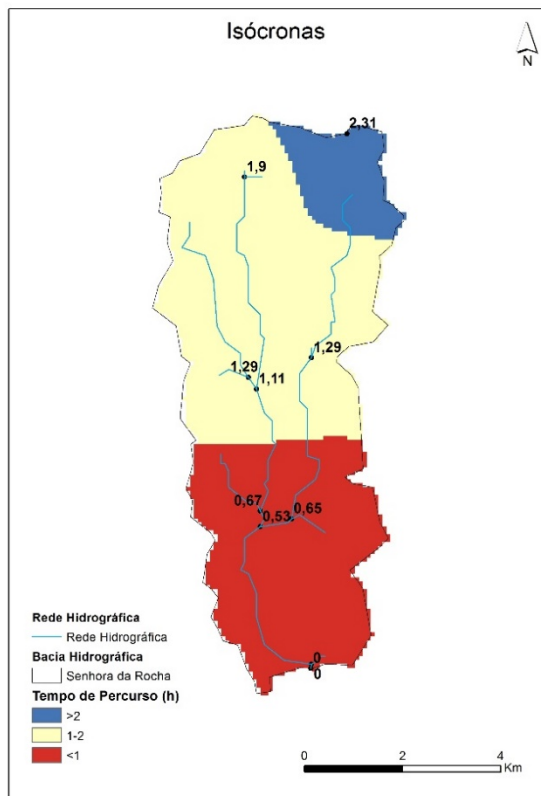
LAVEIRAS (FUNÇÃO DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS ISÓCRONAS)

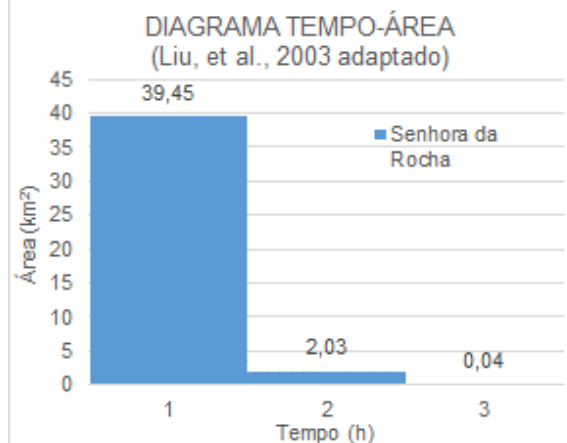
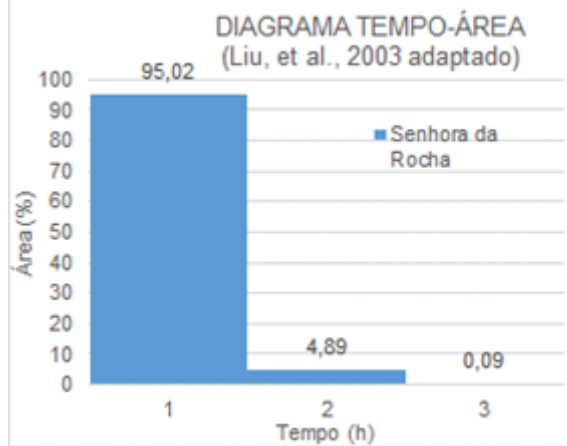
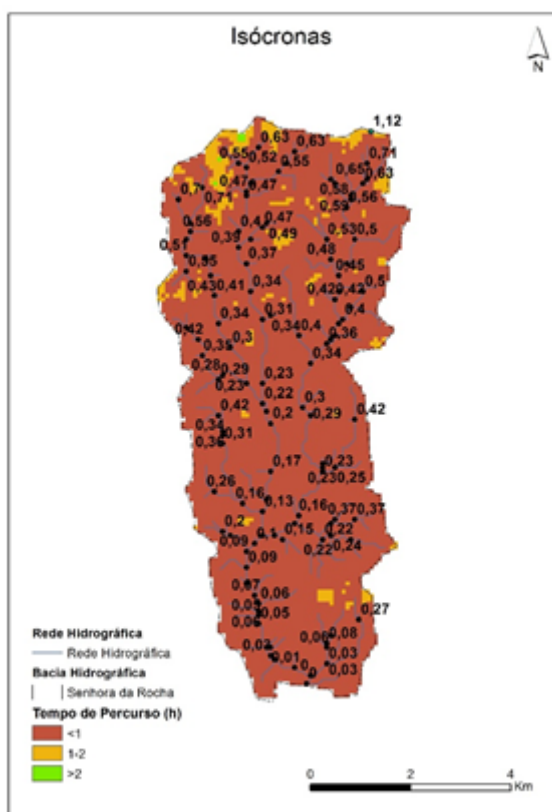
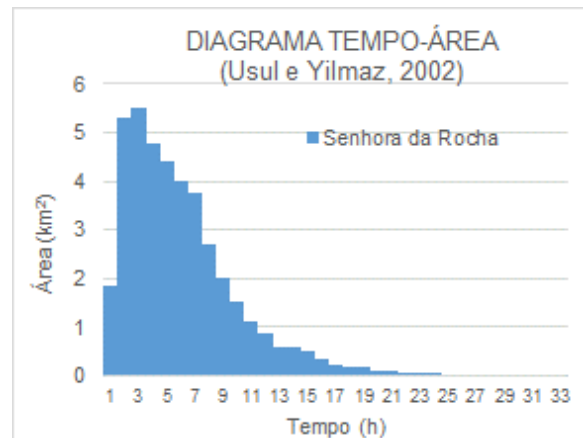
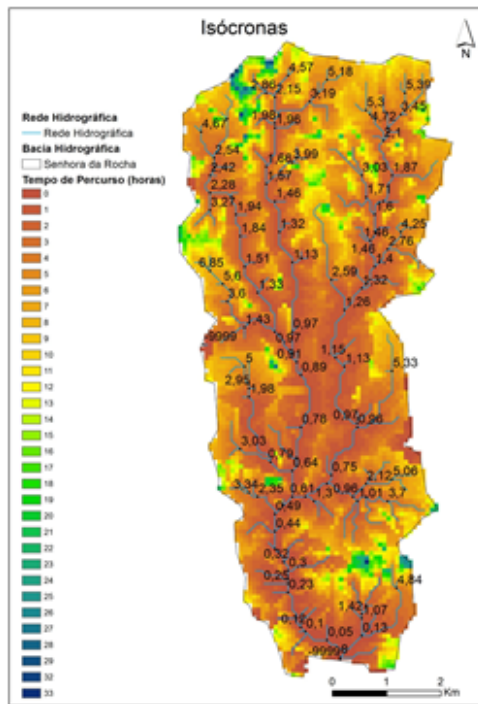


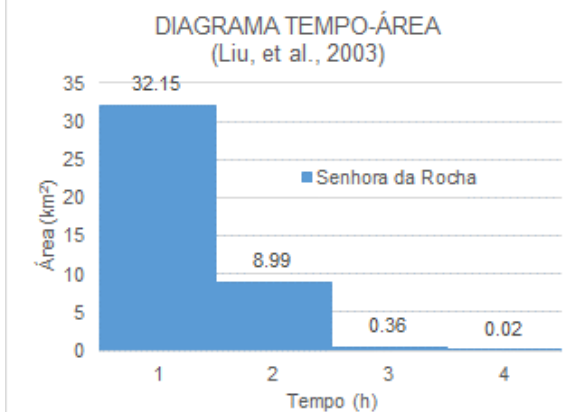
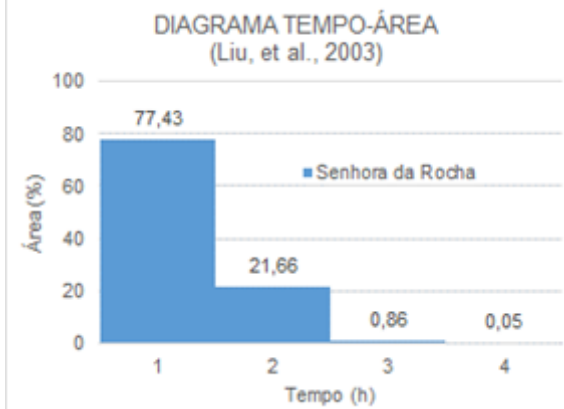
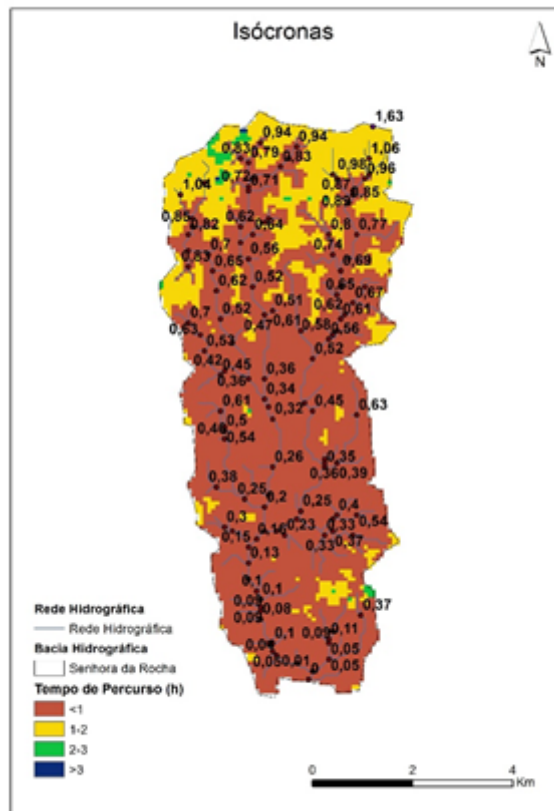




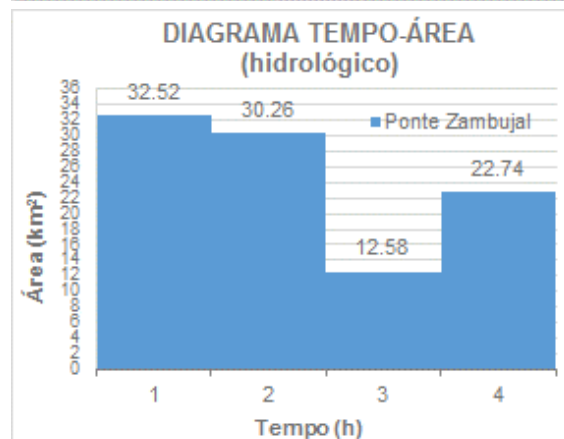
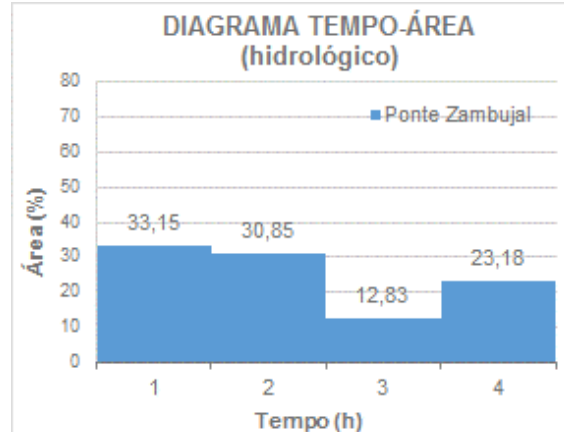
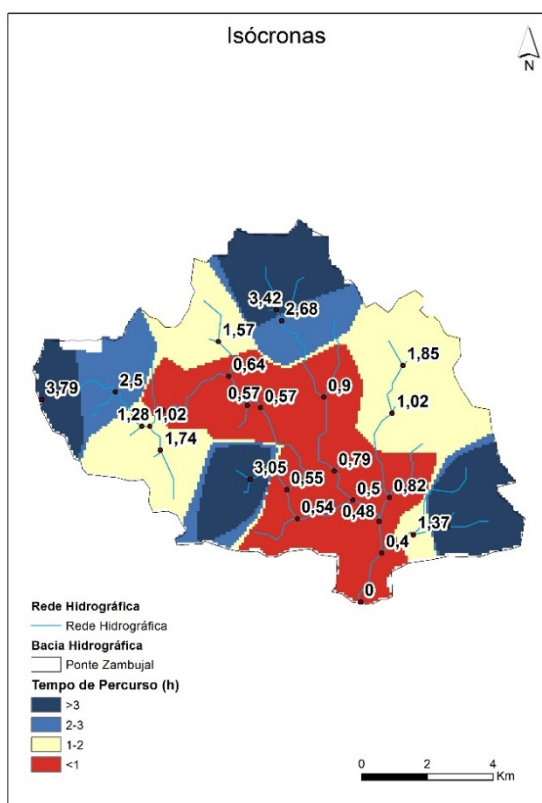
SENHORA DA ROCHA (FUNÇÃO DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS ISÓCRONAS)

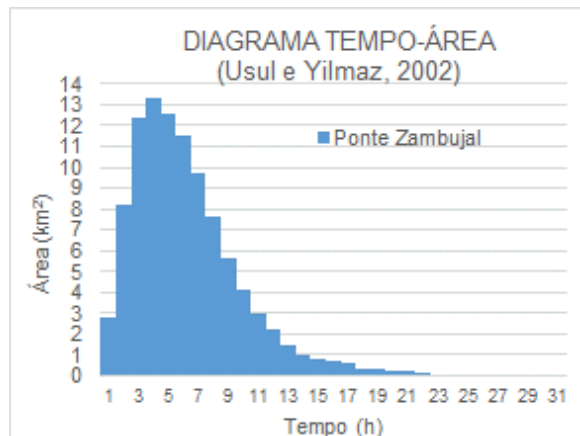
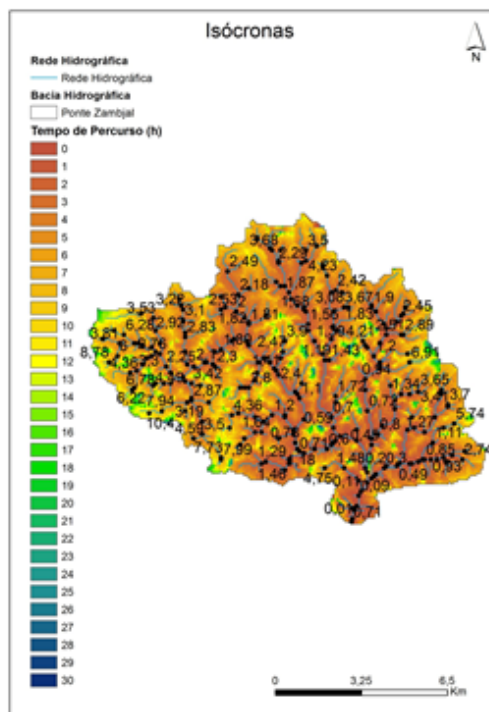
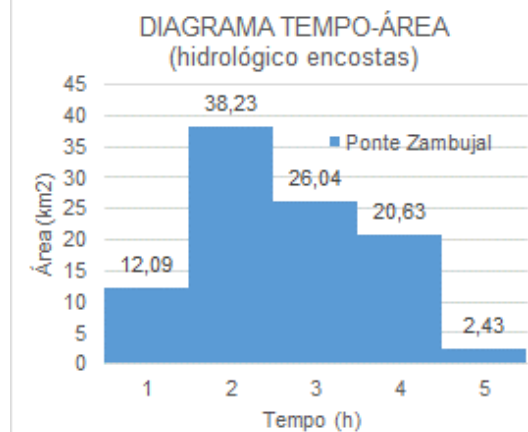
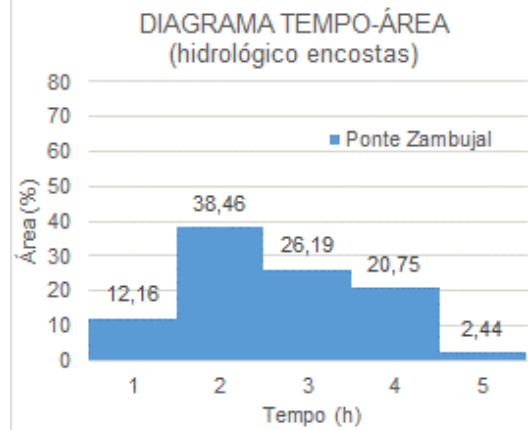
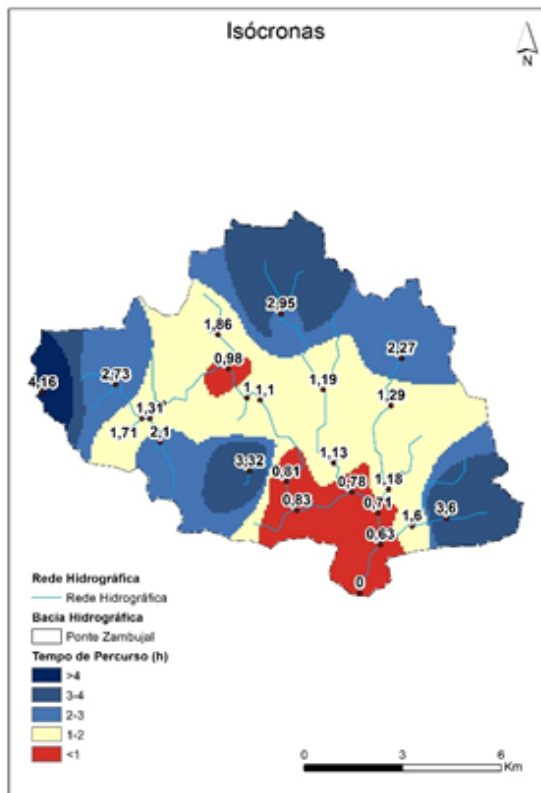




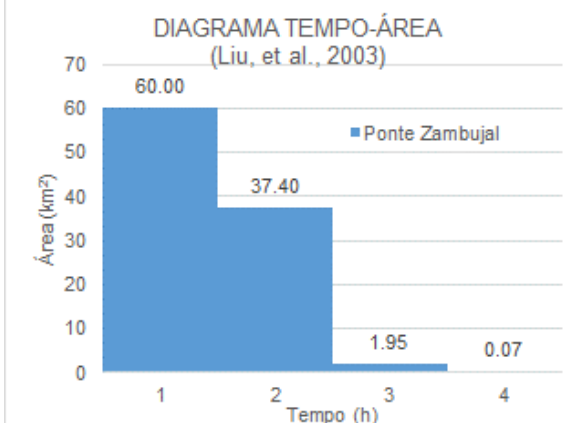
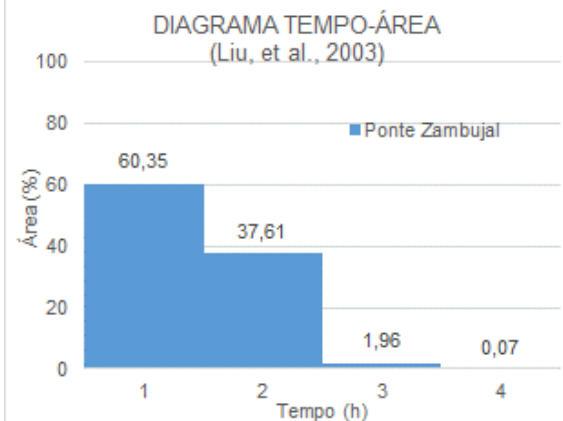
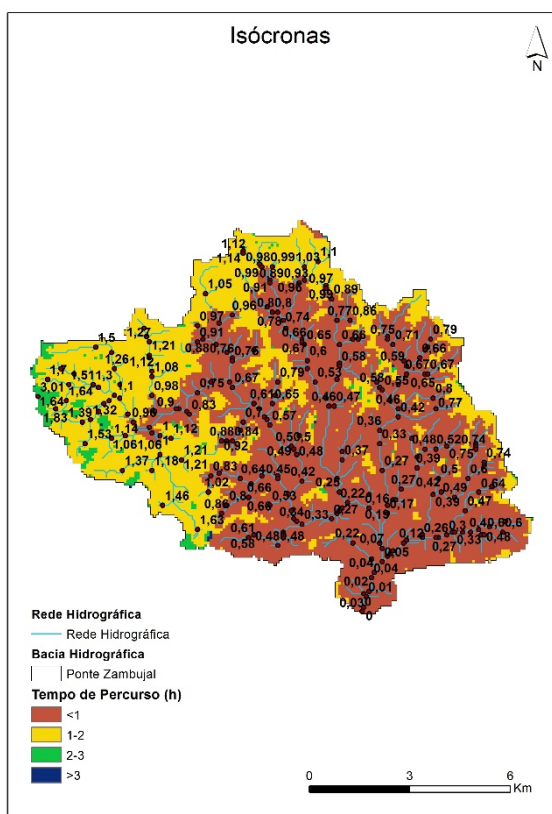


PONTE ZAMBUJAL (FUNÇÃO DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS ISÓCRONAS)

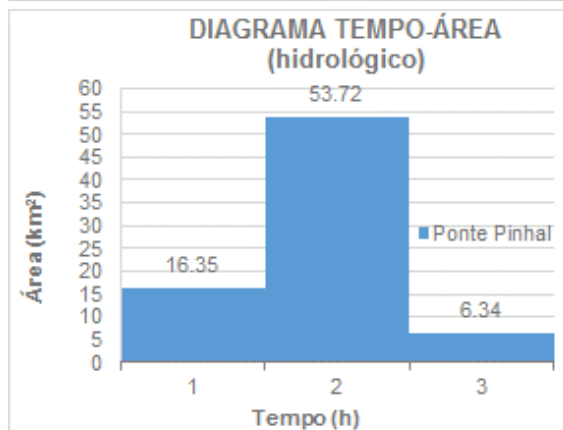
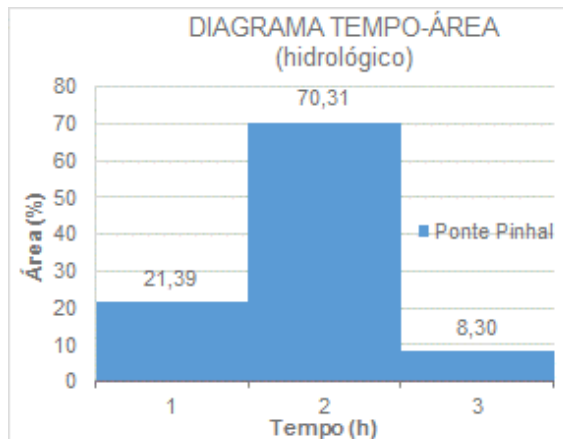
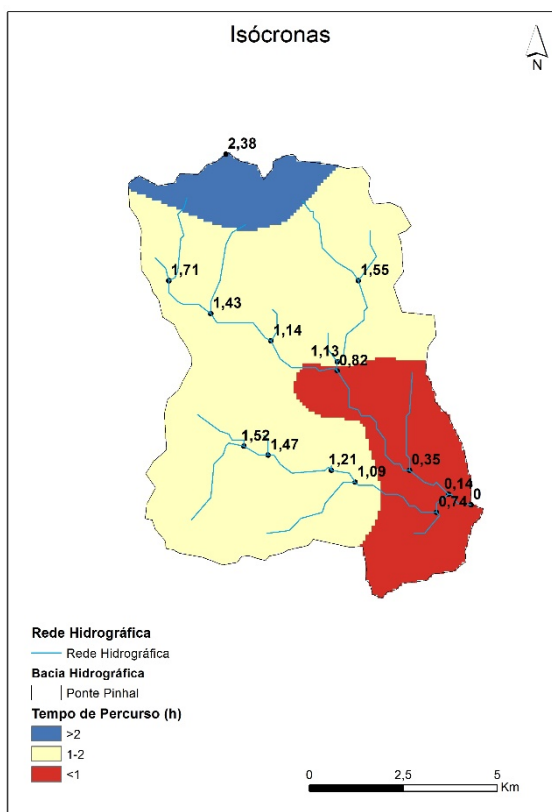


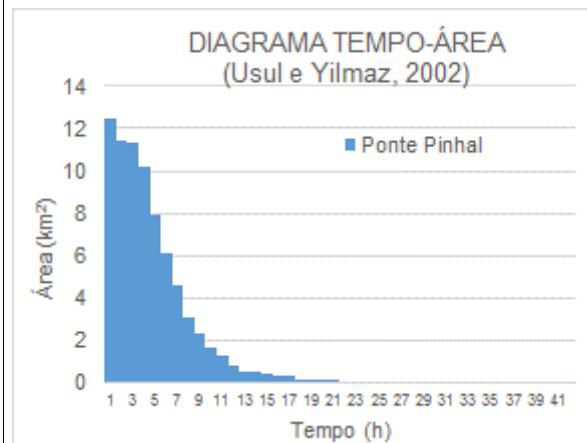
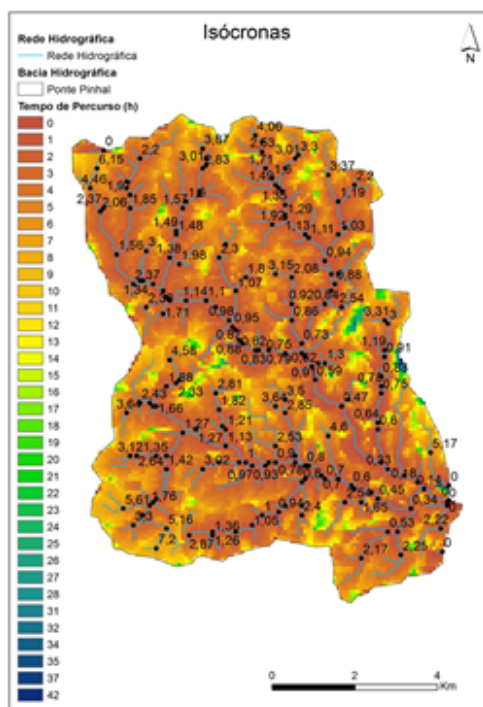
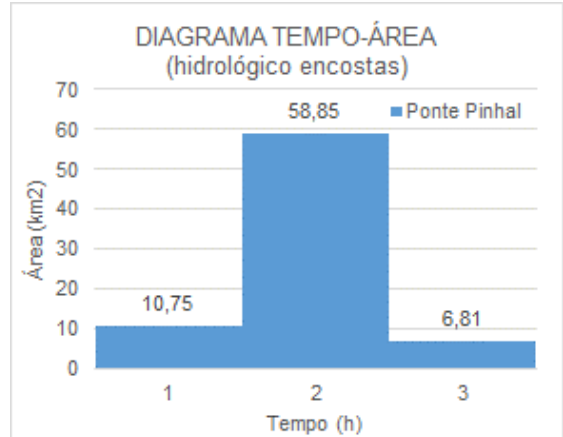
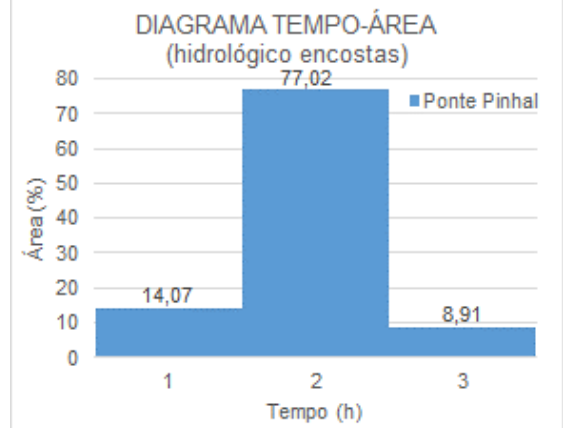
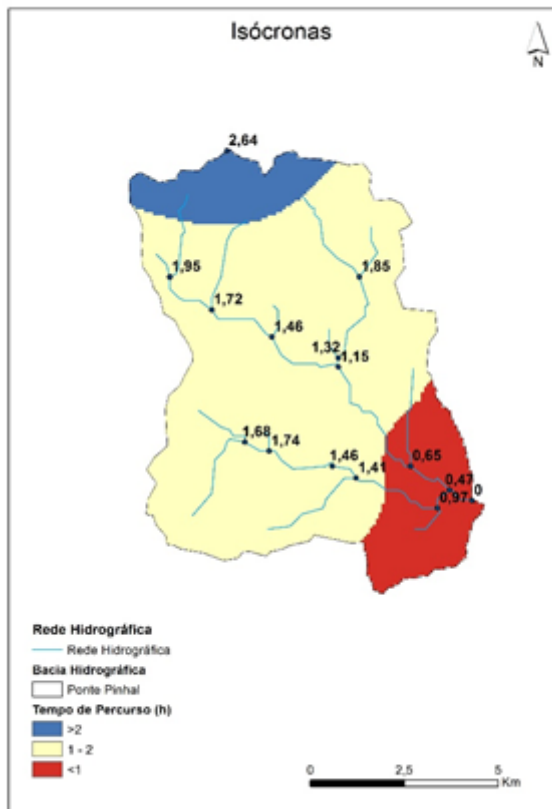


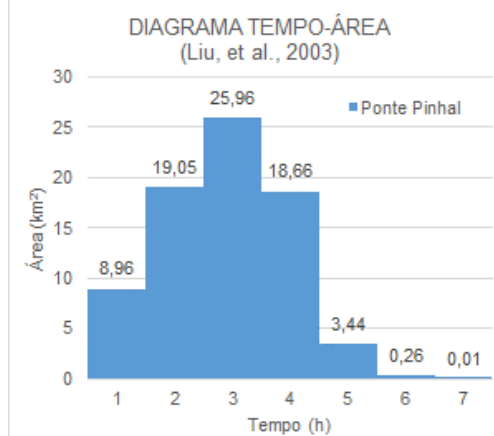
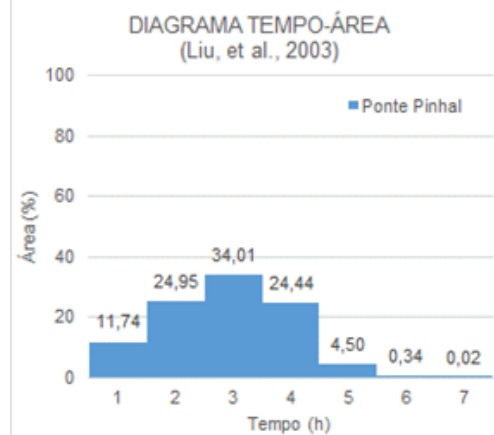
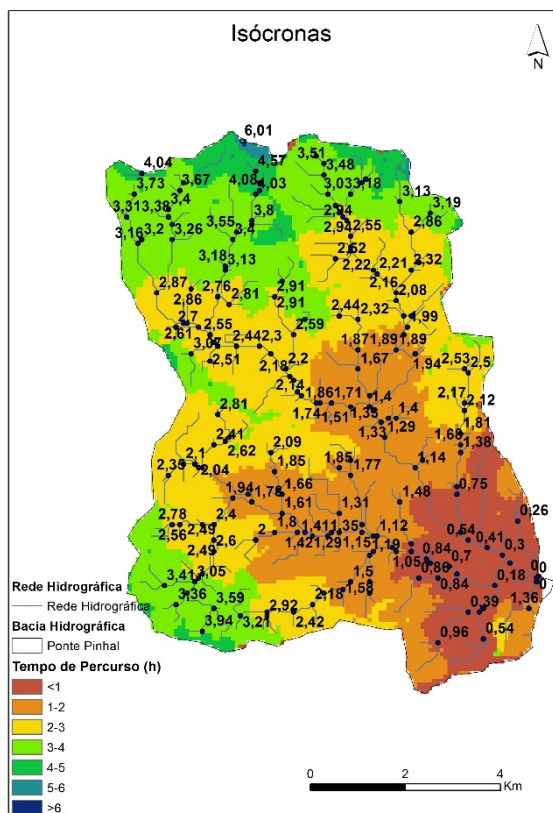
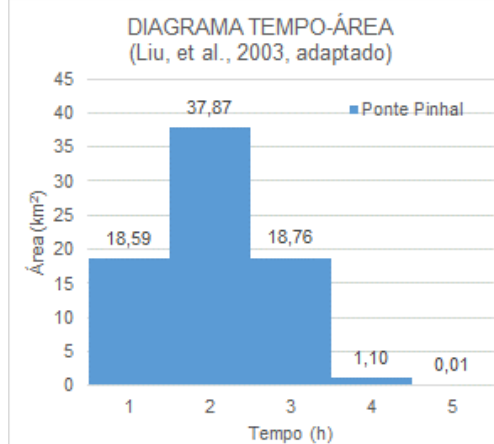
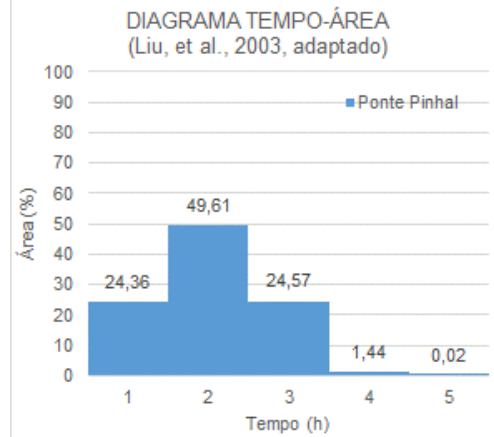
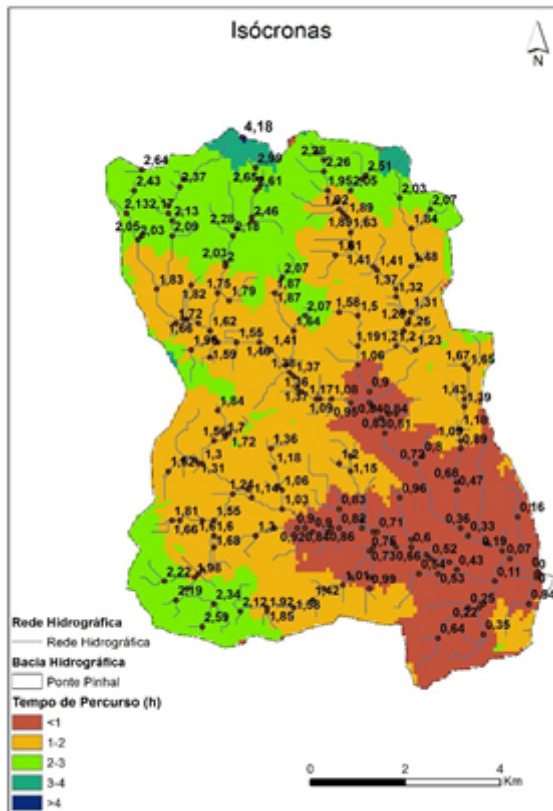
Não é possível aplicar o método proposto por Liu, et al. (2003, adaptado), pois não é conhecida a secção da estação de Ponte Zambujal



PONTE PINHAL (FUNÇÃO DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS ISÓCRONAS)







COLARES (FUNÇÃO DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS ISÓCRONAS)

